



# **UNIVERSIDAD DE CUENCA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **MAESTRIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

***PROGRAMACIÓN A LARGO PLAZO DE LA OPERACIÓN DE LAS  
CENTRALES EN CASCADA DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO  
PAUTE UTILIZANDO LA PLATAFORMA MATLAB.***

---

Tesis para obtener el Título de  
Magister en Sistemas  
Eléctricos de Potencia

**Autor**

**Vicente Alejandro Llivichuzhca Peralta**

Director: Ing. Raúl León Piedra.

**2013**

***Cuenca - Ecuador***

## **RESUMEN**

El Complejo Hidroeléctrico Paute al poseer sus centrales hidroeléctricas de Mazar y Molino (actualmente) con embalses en cascada, involucra directamente a tomar decisiones respecto a, cuando usar el agua y cuanto usar en su debido momento. Por tal razón en esta tesis se modela sus características particulares y se determina una planeación adecuada del recurso hídrico de los embalses de Mazar y Amaluza en el largo plazo (un año), satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones propias del complejo, logrando al final un mejoramiento en la producción hidroeléctrica y de la eficiencia de las centrales (Mazar y Molino), esto gracias al desarrollo de una herramienta (algoritmo computacional) basada en Programación Dinámica, técnica que ha mostrado ser de gran utilidad para el tratamiento de este tipo de problemas de recursos hídricos.

Los análisis en base al algoritmo desarrollado facilita determinar reglas operativas en diferentes escenarios que a su vez contemplan restricciones del complejo, como tal es el caso del tiempo utilizado por mantenimiento de las unidades de generación y de las estimaciones de los caudales de ingreso de la cuenca del río Paute, brindando al gestor u operador de los embalses y centrales una orientación en la determinación de aquellos volúmenes de turbinamiento, curvas guía de embalses, restricciones operativas de las centrales que puedan ayudar al objetivo de la producción de energía hidroeléctrica del complejo y por ende a colaborar con el abastecimiento de energía eléctrica al sistema nacional interconectado.

**Palabras clave:** Complejo Hidroeléctrico Paute, Embalses en cascada, Programación Dinámica Incremental, Generación hidroeléctrica, Operación de embalses.

## **ABSTRACT**

The Paute Hydroelectric Complex to possess its hydroelectric power plants Mazar and Molino (currently) with cascaded reservoirs directly involves making decisions about when to use the water and how much to use in their due time. For this reason, in this thesis is modeled their particular characteristics and determine proper planning of water resources Amaluza and Mazar reservoirs in the long term (one year), satisfying at the same time the restrictions of the complex, reaching at the end an improvement in hydroelectric production and the efficiency of the plants (Mazar and Molino), this thanks to the development of a tool (computer algorithm) based on dynamic programming, a technique that has been shown to be of great utility for the treatment of this type of problems of water resources.

The analysis based on the algorithm developed facilitates determining operational rules in different scenarios which in turn provide for restrictions on the complex, as such is the case, the time used for maintenance of the generating units and estimates of income flows from the Paute River basin, giving the manager or operator of the reservoirs and central guidance in determining those volumes turbine discharge, guide curves reservoirs, plants operating restrictions that may assist the objective of hydropower production complex thus to contribute to the supply of electricity to the national grid system.

**Keywords:** Paute Hydroelectric Complex, Cascade Reservoir, Incremental Dynamic Programming, Hydroelectric generation, Operation of reservoirs

## **INDICE DE CONTENIDOS**

<b>RESUMEN .....</b>	<b>2</b>
<b>INDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>4</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>12</b>
<b>INDICE DE ANEXOS .....</b>	<b>14</b>
<b>DERECHOS DE AUTOR.....</b>	<b>15</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>17</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>18</b>
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
<b>1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>22</b>
<b>DESCRIPCION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO PAUTE INTEGRAL.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>22</b>
2.1.1 UBICACIÓN .....	23
<b>2.2 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....</b>	<b>23</b>
2.2.1 CENTRAL MAZAR .....	24
2.2.1.1 PRESA Y EMBALSE MAZAR.....	24
2.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CENTRAL MAZAR. ....	25
2.2.2 CENTRAL MOLINO .....	27
2.2.2.1 PRESA Y EMBALSE AMALUZA. ....	27
2.2.2.2 CARACTERISTICAS DE LA CENTRAL MOLINO. ....	28
2.2.3 PRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	29
2.2.3.1 PRODUCCIÓN DE LA CENTRAL MOLINO. ....	29
2.2.3.2 PRODUCCIÓN DE LA CENTRAL MAZAR. ....	30
<b>2.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>31</b>
2.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA. ....	31
<b>2.4 ANÁLISIS DE SERIES HISTÓRICAS .....</b>	<b>32</b>
2.4.1 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES ENTRANTES A LA ZONA DEL EMBALSE AMALUZA ....	33
2.4.2 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES ENTRANTES SITIO DE PRESA MAZAR .....	34
2.4.3 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES LATERALES ENTRANTES AL EMBALSE AMALUZA .....	35
2.4.4 ESTADISTICA DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE CAUDALES.....	37

<b>CAPITULO III .....</b>	<b>38</b>
<b>PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 INTRODUCCION .....</b>	<b>38</b>
3.1.1 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN Y BÚSQUEDA .....	38
<b>3.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....</b>	<b>39</b>
3.2.1 DEFINICIÓN .....	39
3.2.1.1 PROGRAMACIÓN DINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS.....	41
3.2.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA DETERMINÍSTICA .....	42
3.2.3 PROGRAMACIÓN DINÁMICA ESTOCÁSTICA .....	44
3.2.4 LA DIMENSIONALIDAD .....	45
3.2.5 EL MÉTODO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA INCREMENTAL.....	46
3.2.6 MÉTODO DE INTERCONEXIÓN DE LOS EMBALSES .....	50
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>52</b>
<b>MODELO PARA LA PROGRAMACIÓN OPTIMA DE LAS CENTRALES DEL COMPLEJO PAUTE .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 MODELO DEL COMPLEJO HIDROELECTRICO PAUTE. ....</b>	<b>52</b>
<b>4.3 FORMULACION MATEMATICA DE OPTIMIZACION.....</b>	<b>55</b>
4.3.1 FUNCION OBJETIVO.....	55
4.3.2 RESTRICCIONES .....	56
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>61</b>
<b>IMPLEMENTACION DEL MODELO UTILIZANDO PROGRAMACION DINAMICA .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL UTILIZANDO PROGRAMACION DINAMICA DETERMINISTICA .....</b>	<b>61</b>
5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL “PRODIPA” .....	61
5.1.2 DESCRIPCION DEL ALGORITMO.....	64
<b>5.2 PRUEBA DEL MODELO .....</b>	<b>69</b>
5.2.1 SIMULACION DE LA CENTRAL MOLINO SIN CONSIDERAR LA CENTRAL MAZAR AÑO 1999-2000 .....	69
5.2.2 SIMULACION DE LA CENTRAL MOLINO CONSIDERANDO LA CENTRAL MAZAR AÑO 1999-2000 .....	71
5.2.3 ANALISIS COMPARATIVO .....	73
<b>5.3 SIMULACIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
5.3.1 SIMULACION DEL PERIODO HISTORICO .....	77
5.3.2 SIMULACION PRODIPA VERSUS EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SNI DEL CENACE .....	80



5.3.2.1	ANALISIS DE PRODIPA VS EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO PERIODOS (OCTUBRE 2011-SEPTIEMBRE 2012) – (ENERO 2012 – DICIEMBRE 2012) .....	82
5.3.3	SIMULACION CON CAUDALES GENERADOS .....	90
5.3.3.1	RESULTADOS DE PRODIPA EN EL PERIODO OCTUBRE 2012 - SEPTIEMBRE 2013 CON CAUDALES GENERADOS.....	90
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>98</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>98</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>101</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>107</b>
ANEXO A .....		107
ANEXO B .....		108
ANEXO C .....		109
ANEXO D .....		111
ANEXO E .....		112
ANEXO F .....		114
ANEXO G .....		116
ANEXO H .....		118
ANEXO I .....		119
ANEXO J .....		120
ANEXO K .....		121
ANEXO L .....		124
ANEXO M .....		127
ANEXO N .....		131
ANEXO O .....		133
ANEXO P .....		135
ANEXO Q .....		137
ANEXO R .....		145
ANEXO S .....		153

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 2. 1 Disposición general del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. ....	23
Figura 2. 2 Presa de la central Mazar.....	25
Figura 2. 3 Zona de operación de las unidades de generación de la central Mazar en función de las alturas netas de trabajo .....	26
Figura 2. 4 Vista de la Presa Daniel Palacios de la central Molino.....	27
Figura 2. 5 Curvas de caudal incremental vs potencia de la unidad.....	28
Figura 2. 6 Producción de energía histórica de la central Molino .....	30
Figura 2. 7 Histograma de producción de energía bruta mensual de la Central Paute – Mazar del año 2010 .....	31
Figura 2. 8 Zona administrativa y política de la cuenca del Paute.....	31
Figura 2. 9 Cuencas que aportan al complejo hidroeléctrico Paute integral.....	32
Figura 2. 10 Representación de caudales de ingreso en el tiempo .....	33
Figura 2. 11 Caudales medios anuales de la zona del embalse Amaluza .....	34
Figura 2. 12 Caudales medios anuales del sitio de presa Mazar .....	35
Figura 2. 13 Caudales laterales medios anuales entrantes al sitio del embalse Amaluza	36
Figura 3. 14 Esquema de la ecuación recursiva de Bellman .....	40
Figura 3. 15 Trayectorias factibles de operación de un embalse .....	42
Figura 3. 16 Estructura básica de la programación dinámica determinista .....	43
Figura 3. 17 Trayectoria óptima con programación dinámica determinista .....	44
Figura 3. 18 Estructura básica de la programación dinámica estocástica .....	45
Figura 3. 19 Diagrama de flujo base de la Programación dinámica incremental .....	46
Figura 3. 20 Diagrama del método programación dinámica incremental.....	47
Figura 3. 21 Trayectoria nueva del método programación dinámica incremental .....	48
Figura 3. 22 Formación del nuevo corredor método programación dinámica incremental .....	49
Figura 3. 23 Diagrama del método programación dinámica incremental para dos variables de estado.....	50
Figura 3. 24 Diagrama de flujo para el método de interconexión de los embalses .....	51
Figura 4. 25 Distribución física del complejo hidroeléctrico Paute integral .....	53
Figura 4. 26 Modelo del complejo hidroeléctrico Paute embalses de Mazar y Molino ...	53
Figura 4. 27 Variables del Modelo del complejo hidroeléctrico Paute embalses de Mazar y Molino.....	56
Figura 5. 28 Interfaz principal del programa computacional desarrollado .....	61
Figura 5. 29 Interfaz para el análisis con caudales históricos del complejo Paute.....	62
Figura 5. 30 Interfaz para la selección de caudales generados .....	63
Figura 5. 31 Interfaz para el ingreso manual de caudales y trayectoria inicial de los embalses de Mazar y Molino.....	63
Figura 5. 32 Interfaz para el ingreso en horas del Plan de mantenimiento de las unidades de generación de la centrales Mazar y Molino .....	64
Figura 5. 33 Bosquejo del diagrama de flujo de la programación computacional del modelo del complejo hidroeléctrico Paute. ....	66
Figura 5. 34 Energía de la central molino .....	70
Figura 5. 35 Volúmenes y Niveles mensuales del Embalse Amaluza.....	70
Figura 5. 36 Caudal turbinado de la central y caudal de vertimiento del embalse .....	70
Figura 5. 37 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino .....	71

Figura 5. 38 Volúmenes mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza .....	72
Figura 5. 39 Niveles mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza .....	72
Figura 5. 40 Caudales turbinados y caudales de vertimiento mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza .....	72
Figura 5. 41 Energía de la central Molino .....	74
Figura 5. 42 Caudales turbinados mensuales del Embalse Amaluza .....	74
Figura 5. 43 Caudales de vertimiento mensuales del Embalse Amaluza.....	75
Figura 5. 44 Nivel del embalse Amaluza .....	76
Figura 5. 45 Nivel del embalse Mazar.....	76
Figura 5.46 Producción de energía de la central Molino periodo 1994-2011 de manera aislada.....	78
Figura 5.47 Producción de energía para las centrales Molino y Mazar periodo 1994-2011 de manera conjunta .....	78
Figura 5. 48 Nivel del embalse Amaluza .....	79
Figura 5. 49 Vertimiento del embalse Amaluza.....	80
Figura 5. 50 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	82
Figura 5. 51 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	83
Figura 5. 52 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	83
Figura 5. 53 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	83
Figura 5. 54 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI.....	84
Figura 5. 55 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	84
Figura 5. 56 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	84
Figura 5. 57 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI.....	85
Figura 5. 58 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI .....	85
Figura 5. 59 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	85
Figura 5. 60 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI.....	86
Figura 5. 61 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	86
Figura 5. 62 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	86
Figura 5. 63 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	87
Figura 5. 64 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	87
Figura 5. 65 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	87
Figura 5. 66 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	88



Figura 5. 67 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	88
Figura 5. 68 Ejemplo de Series de caudales generados despliegue “caudalgen” .....	91
Figura 5. 69 Despliegue para el análisis del modelo con caudales generados. ....	91
Figura 5. 70 Volúmenes del embalse, Generación de Energía y caudales de turbinamiento y vertimiento de las centrales de Mazar y Molino .....	92
Figura 5. 71 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	93
Figura 5. 72 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	93
Figura 5. 73 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	94
Figura 5. 74 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	94
Figura 5. 75 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	94
Figura 5. 76 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	95
Figura 5. 77 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI .....	95
Figura 5. 78 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI .....	95
Figura 5. 79 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI .....	96
Figura C. 80 Producción de energía anual de la central Paute molino. ....	110
Figura E. 81 Curva de probabilidad del caudal de ingreso al embalse Amaluza .....	113
Figura E. 82 Curva de variación estacional caudales medios mensuales a la zona del embalse Amaluza .....	113
Figura F. 83 Curva de variación estacional caudales medios mensuales al embalse Mazar .....	115
Figura G. 84 Curva de variación estacional caudales laterales entrantes medios mensuales al sitio del embalse Amaluza .....	117
Figura I. 85 Etapa del problema de optimización .....	119
Figura J.86 Trayectoria inicial de referencia del embalse Mazar.....	120
Figura J.87 Trayectoria inicial de referencia del embalse Amaluza .....	120
Figura K.88 Producción de energía por cada etapa de acuerdo a los puntos discretos ..	121
Figura K.89 Trayectoria inicial de referencia del embalse con su corredor.....	121
Figura K.90 Producción óptima calculada.....	122
Figura K.91 Trayectoria óptima calculada.....	123
Figura K.92 Trayectorias debido a los valores máximos de generación por etapa .....	123
Figura L.93 Energía de la central Molino .....	124
Figura L.94 Volumen mensual del embalse Amlauza .....	125
Figura L.95 Nivel mensual del embalse Amaluza.....	125
Figura L.96 Caudal turbinado y caudal vertido de la central Molino.....	125
Figura M.97 Producción de energía para la central Mazar y central Molino .....	128
Figura M.98 Volúmenes mensuales de los embalses Mazar y Amaluza.....	128
Figura M.99 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	129

Figura M.100 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	129
Figura N.101 Producción de energía de la central Molino periodo 1994-2011 .....	131
Figura N.102 Volúmenes mensuales del embalse Amaluza periodo 1994-2011 .....	132
Figura N.103 Niveles mensuales del embalse Amaluza periodo 1994-2011 .....	132
Figura N.104 Caudal turbinado y vertido de la central Molino periodo 1994-2011 .....	132
Figura O.105 Energía para la central Molino y central Mazar periodo 1994-2011 .....	133
Figura O.106 Volúmenes mensuales de los embalses Mazar y Amaluza periodo 1994-2011 .....	134
Figura O.107 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza periodo 1994-2011 .....	134
Figura O.108 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino periodo 1994-2011 .....	134
Figura Q.109 Trayectoria del embalse de Mazar periodo octubre 2011 – septiembre 2012 .....	138
Figura Q.110 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo octubre 2011 – septiembre 2012 .....	138
Figura Q.111 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	139
Figura Q.112 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	139
Figura Q.113 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	140
Figura Q.114 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	141
Figura Q.115 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	141
Figura Q.116 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	142
Figura Q.117 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	143
Figura Q.118 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	143
Figura Q.119 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	144
Figura R.120 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo enero 2012 – diciembre 2012 .....	146
Figura R.121 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo enero 2012 – diciembre 2012 .....	146
Figura R.122 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	147
Figura R.123 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	147
Figura R.124 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	148
Figura R.125 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	149
Figura R.126 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	149
Figura R.127 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	150
Figura R.128 Producción de energía para la central Molino y central Mazar .....	151
Figura R.129 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza .....	151
Figura R.130 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino .....	152
Figura S.131 Niveles del embalse Mazar Plan Anual operativo del CENACE .....	154
Figura S.132 Niveles del embalse Amaluza Plan Anual operativo del CENACE .....	155



Figura S.133 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013 .....	155
Figura S.134 Producción de Energía de las centrales de Mazar y Molino simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013 .....	156
Figura S.135 Caudales de turbinamiento y vertimiento de Mazar y Molino simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013 .....	156

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2. 1 Capacidad de la Centrales Hidroeléctricas del Complejo Paute Integral .....	24
Tabla 2. 2 Características de la Presa y Embalse Mazar .....	25
Tabla 2. 3 Características de la central Mazar .....	27
Tabla 2. 4 Características del embalse Amaluza (datos actuales) .....	28
Tabla 2. 5 Características de la central Molino.....	29
Tabla 5. 6 Comparación de resultados de la estadística de Molino versus “prodipa” .....	73
Tabla A. 1 Características de la presa Mazar .....	107
Tabla A. 2 Características de la central Mazar .....	107
Tabla B. 3 Características de la presa Amaluza.....	108
Tabla B. 4 Características de la central Molino.....	108
Tabla C.5 Producción mensual histórica de la central Molino.....	109
Tabla C. 6 Producción de energía máxima, promedio, mínima de la central Molino [GWh] .....	110
Tabla C. 7 Parámetros estadísticos de producción de energía de la central Molino .....	110
Tabla D.8 Producción mensual histórica de la central Mazar.....	111
Tabla E. 9 Caudales afluentes medios mensuales a la zona del Embalse Amaluza .....	112
Tabla F.10 Caudales afluentes medios mensuales del embalse Mazar .....	114
Tabla G.11 Caudales afluentes laterales medios mensuales entrantes al sitio del embalse Amaluza .....	116
Tabla H. 12 Parámetros estadísticos de los caudales afluentes medios mensuales del embalse Amaluza.....	118
Tabla H. 13 Parámetros estadísticos de los caudales afluentes medios mensuales del sitio de presa Mazar .....	118
Tabla H. 14 Parámetros estadísticos de los caudales medios mensuales para los afluentes laterales del embalse Amaluza .....	118
Tabla K. 15 Producción de energía de acuerdo a los puntos discretos calculada .....	121
Tabla K. 16 Producción de energía acumulada y subóptimas por cada etapa .....	122
Tabla K. 17 Producción de energía óptima y puntos de trayectoria óptimos .....	122
Tabla K. 18 Valores de energía máxima por cada etapa.....	123
Tabla L. 19 Nivel inicial del embalse Amaluza .....	124
Tabla L. 20 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Molino [Horas] .....	124
Tabla L. 21 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino proporcionados por prodipa .....	126
Tabla L. 22 Estadística del embalse Amaluza y de la central Molino 1999-2000 .....	126
Tabla M. 23 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar .....	127
Tabla M. 24 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas] .....	127
Tabla M. 25 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	130
Tabla N. 26 Valores iniciales del embalse Amaluza .....	131
Tabla N. 27 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Molino [Horas] .....	131
Tabla O. 28 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar.....	133
Tabla O. 29 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas] .....	133

Tabla P. 30 Programa de mantenimiento anual de las unidades de la central Mazar y Molino periodo octubre 2011 septiembre 2012 .....	135
Tabla Q. 31 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar.....	137
Tabla Q. 32 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas] .....	137
Tabla Q. 33 Resultados del embalse y de la central Mazar dentro del Plan de operación del SNI.....	137
Tabla Q. 34 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino dentro del Plan de operación del SNI.....	138
Tabla Q. 35 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	140
Tabla Q. 36 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	142
Tabla Q. 37 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	144
Tabla R. 38 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar .....	145
Tabla R. 39 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas] .....	145
Tabla R. 40 Resultados del embalse y de la central Mazar dentro del Plan de operación del SNI.....	145
Tabla R. 41 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino dentro del Plan de operación del SNI.....	146
Tabla R. 42 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	148
Tabla R. 43 Resultados de los embalses centrales proporcionados por prodipa .....	150
Tabla R. 44 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa .....	152
Tabla S. 45 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar.....	153
Tabla S. 46 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas] .....	153
Tabla S. 47 Resultados del embalse y de la central Mazar proporcionados por el plan anual operativo del sistema nacional interconectado SNI.....	154
Tabla S. 48 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino proporcionados por el plan anual operativo del sistema nacional interconectado SNI .....	154
Tabla S. 49 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología alta.....	156
Tabla S. 50 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología media.....	157
Tabla S. 51 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología baja .....	157

## **INDICE DE ANEXOS**

ANEXO A	Características de la presa y central Mazar.....	107
ANEXO B	Características de la presa Amaluza y central Molino .....	108
ANEXO C	Producción Mensual Histórica de la central Molino.....	109
ANEXO D	Producción Mensual Histórica de la central Mazar .....	111
ANEXO E	Caudales Afluentes medios mensuales Embalse Amaluza.....	112
ANEXO F	Caudales Afluentes medios mensuales Embalse Mazar .....	114
ANEXO G	Caudales Afluentes Laterales medios mensuales entrantes al sitio del Embalse Amaluza .....	116
ANEXO H	Análisis estadístico de los caudales afluentes.....	118
ANEXO I	Terminología de la Programación Dinámica .....	119
ANEXO J	Trayectorias iniciales de referencia de los embalses Mazar y Amaluza .....	120
ANEXO K	Relación de la producción de energía con los volúmenes del embalse resolución con Programación Dinámica.....	121
ANEXO L	Prueba del modelo año hidrológico 2000 con la consideración operativa solo de la central Molino .....	124
ANEXO M	Prueba del modelo año hidrológico 2000 considerando el embalse y la central Mazar .....	127
ANEXO N	Simulación de la central Molino sin considerar la central Mazar periodo 1994 - 2011 .....	131
ANEXO O	Simulación de la central Molino con la consideración de la central Mazar periodo 1994 - 2011.....	133
ANEXO P	Programa de mantenimiento de las unidades de las central de Mazar y Molino periodo octubre 2011 septiembre 2012 .....	135
ANEXO Q	Simulación del modelo en el periodo octubre 2011 septiembre 2012.....	137
ANEXO R	Simulación del modelo en el periodo enero 2012 - diciembre 2012.....	145
ANEXO S	Simulación del modelo considerando caudales generados en el periodo octubre 2012 – septiembre 2013.....	153

## **DERECHOS DE AUTOR**



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Vicente Alejandro Llivichuzhca Peralta, autor de la tesis "PROGRAMACIÓN A LARGO PLAZO DE LA OPERACIÓN DE LAS CENTRALES EN CASCADA DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO PAUTE UTILIZANDO LA PLATAFORMA MATLAB", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Sistemas Eléctricos de Potencia. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 01 de octubre de 2013



Vicente Alejandro Llivichuzhca P.  
0103549911

---

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316  
e-mail: cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103  
Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Vicente Alejandro Llivichuzhca Peralta, autor de la tesis "PROGRAMACIÓN A LARGO PLAZO DE LA OPERACIÓN DE LAS CENTRALES EN CASCADA DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO PAUTE UTILIZANDO LA PLATAFORMA MATLAB", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 01 de octubre de 2013

Vicente Alejandro Llivichuzhca P.  
0103549911

---

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail: cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



### **DEDICATORIA**

*Para las personas que están constantemente vigilantes de mi superación como profesional y como ser humano, mi familia, de manera especial a Carlos y Ana mis Padres.*

*A mis hermanos, seres que brillan en este mundo por el simple hecho de formar parte de él.*

*A Glenda, que con su sacrificio, constancia y paciencia fue la fortaleza durante este dilatado tiempo de creación.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Gracias, palabra sencilla pero de un gran significado....., por su gran paciencia, por su predisposición, por su guía, y por creer; Gracias, Ing. Raúl León P.*

*Mi agradecimiento para todas las personas e instituciones en especial a Hidropaute, que con su granito de arena de una u otra manera plantaron su aporte para que la culminación de este proyecto llegue a buen término, a todos ustedes, mis Gratitudes.*

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mapa energético del Ecuador se está modificando debido a la nueva presencia de generación y al crecimiento de la demanda de energía eléctrica.

A partir del año 2010 en el país empezó a generar la central hidroeléctrica Mazar que pertenece al Complejo Hidroeléctrico Paute Integral, por lo que actualmente este complejo está compuesto por las centrales hidroeléctricas de Mazar y Molino, y de los embalses Mazar y Amaluza dispuestos en cascada respectivamente.

La presa que forma parte de la central Mazar crea el embalse de cabecera del complejo, y éste a su vez suministra el ingreso de agua para el embalse Amaluza y centrales de generación del complejo hidroeléctrico Paute. El acoplamiento espacial y temporal entre las centrales hidroeléctricas de Mazar y Molino situadas en la cuenca del Paute hace que las condiciones de cada central sean dependientes, de modo que sus operaciones deben ser completamente coordinadas. Por lo tanto, se ve la necesidad de realizar una programación adecuada y en conjunto de la operación de las centrales que conforman el complejo, basándose en un correcto suministro de agua para cada una de las centrales así como de mantener un nivel conveniente en sus embalses en el periodo de estudio.

Debido que recae en las propias empresas buscar herramientas que apoyen en la búsqueda de decisiones valederas en el periodo de planeación y al no existir una programación de producción interna dentro de la unidad de negocio Hidropaute (administrador del complejo) entre las dos centrales existentes del complejo Paute, se pretende con esta tesis modelar los dos embalses en cascada, y establecer una planeación y uso eficiente del recurso hídrico de los embalses y de sus centrales de generación en el largo plazo, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones propias del complejo.

Es pertinente señalar que esta tesis se delimita únicamente en encontrar una planeación adecuada al complejo hidroeléctrico Paute de manera puntual en el contexto de un sistema integrado de embalses dispuestos en serie, y no considera dentro de su análisis al sistema nacional interconectado SNI en su

conjunto. Y en base a lo señalado anteriormente se podría estimar los beneficios directos de la central Molino, atribuibles a la central Mazar, por medio de la optimización de la producción mensual de energía de la central Molino.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional para apoyar a la maximización de la producción hidroeléctrica de las centrales de Mazar y Molino del complejo hidroeléctrico Paute para una programación de largo plazo (12 meses), mediante el uso adecuado del recurso hídrico en sus embalses.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Elaborar un modelo matemático, considerando las características y particularidades del complejo hidroeléctrico Paute para ser usado en la planificación de largo plazo.
- ✓ Desarrollar un algoritmo de optimización basado en programación dinámica, para dar solución al problema de la operación de largo plazo de los embalses en cascada de las centrales hidroeléctricas de Mazar y Molino del complejo Paute.
- ✓ Implementar en la plataforma Matlab® el algoritmo de optimización para evaluar y simular el modelo matemático, con la finalidad de ayudar a establecer las políticas de operación de los embalses y de las centrales de Mazar y Molino del complejo hidroeléctrico Paute.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis desarrollada y presentada en este documento está enmarcada en seis capítulos los mismos que se describen brevemente a continuación.

En el *Capítulo I* se plasma una breve descripción del problema, justificación y planteamiento del trabajo desarrollado, de igual manera se presenta el direccionamiento, alcance y objetivos de la tesis, finalmente se expone una sinopsis de la estructura del documento.

En el *Capítulo II* da a conocer una pequeña reseña histórica del complejo Paute, de igual manera se realiza una descripción de sus particularidades centrándose en las centrales hidroeléctricas de Mazar y Molino así como de sus embalses asociados, también se brinda información sobre la hidrología relevante referente a la cuenca del río Paute enfatizando el capítulo en el análisis de las series históricas de los caudales.

En el *Capítulo III* se realiza una muy breve descripción de los métodos de optimización y búsqueda existentes en la literatura, luego el capítulo se enmarca en explicar los principios del método de la Programación Dinámica, así como de su clasificación y uso de esta metodología en la operación de embalses, dando énfasis el capítulo en la Programación Dinámica Determinística eje central de la metodología propuesta.

En el *Capítulo IV* se investiga y desarrolla un modelo que representa con el detalle necesario las características físicas, técnicas y operativas de los dos embalses en cascada del sistema hidroeléctrico del complejo Paute, específicamente en las centrales de generación de Mazar y Molino, y se establece el objetivo del modelo que consiste en maximizar la producción de energía eléctrica del complejo hidroeléctrico Paute en el largo plazo.

En el *Capítulo V* se realiza una descripción del algoritmo de optimización basado en programación dinámica determinística que es implementado en la plataforma Matlab. Finalmente el capítulo contiene los resultados de los análisis y simulaciones frente a diversos escenarios (anual, mensual), y en base a los mismos, se establecen las políticas de operación de los embalses y centrales del complejo hidroeléctrico Paute.

En el Capítulo VI se exponen las conclusiones de este trabajo, indicando las principales contribuciones de la tesis y señalando posibles direcciones de trabajos futuros en el tema.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO PAUTE INTEGRAL

#### 2.1 ANTECEDENTES

El sitio donde hoy se emplaza el Complejo Hidroeléctrico Paute Integral fue descubierto por el Ingeniero Daniel Palacios Izquierdo [1], en cuyo honor lleva su nombre la presa que forma el embalse Amaluza; este embalse permite la regulación y conducción de las aguas para la central Molino. Por la década de los 50's el ingeniero Palacios descubrió el accidente geográfico que por sus características resultaba en un recurso aprovechable para la generación hidroeléctrica.

Por la década de los 70's el Instituto Nacional Ecuatoriano de Electrificación INECEL<sup>1</sup>, encargado de la planificación y desarrollo de la electrificación, contrata los estudios de pre factibilidad y factibilidad por ser de beneficio para el desarrollo del país; y como señalaba el Plan Maestro de Electrificación en ese entonces, el objetivo del sistema Hidroeléctrico Paute, está dirigido a la utilización de los recursos hídricos que permiten sustituir los recursos no renovables, por fuentes renovables en la generación de energía hidroeléctrica.

El Sistema Hidroeléctrico Paute Integral con estos antecedentes, y de acuerdo a nuevos estudios contratados por Hidropaute se define el aprovechamiento integral del recurso hídrico, mediante cuatro centrales [2]: Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo con la construcción de tres embalses: Mazar, Amaluza, y Cardenillo, (el reservorio de Marcayácu actualmente no se definió en la construcción de la central Sopladora), situados en serie, para una capacidad instalada total de alrededor de 2 300 MW.

Luego de haberse construido el embalse Amaluza y la central Molino con 1 100 MW la etapa siguiente fue la construcción del Proyecto Mazar, el cual garantiza el suministro de agua regulada y la retención de los sedimentos, que afectan al desarrollo y la seguridad operativa de las demás instalaciones ubicadas aguas abajo que se encuentran en operación (Amaluza y Molino) y aquellas que se ejecutan en un futuro próximo

---

<sup>1</sup> El INECEL se disuelve en 1999 de acuerdo a Ley del Régimen del sector eléctrico

### 2.1.1 UBICACIÓN

El Complejo Hidroeléctrico Paute Integral está ubicado en las estribaciones de la cordillera oriental de los Andes en la cuenca del río Paute entre las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago y se desarrolla entre las cotas 2163 y 525 m.s.n.m. aproximadamente [1], [2].

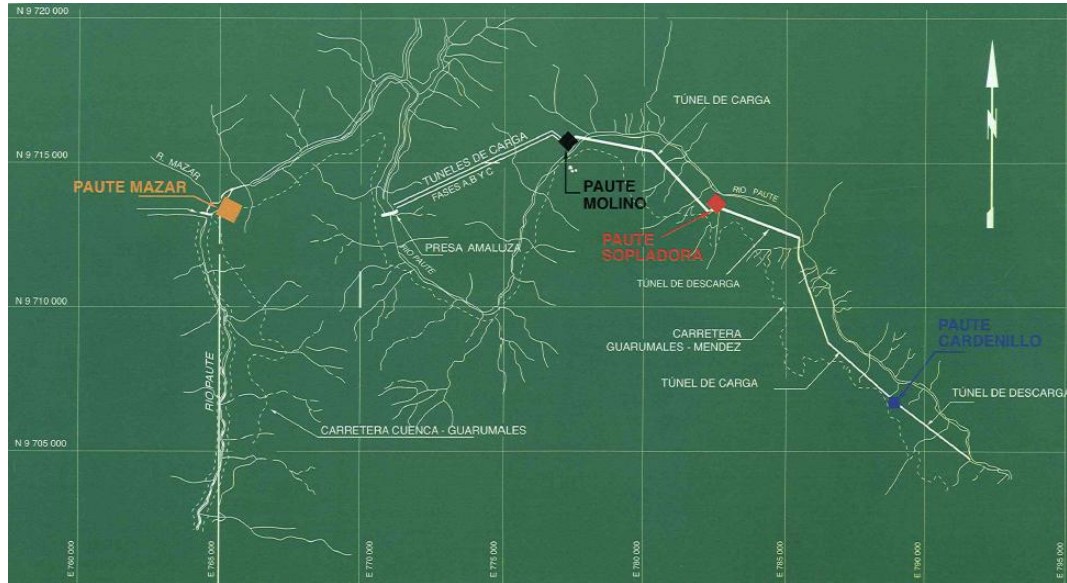


Figura 2. 1 Disposición general del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral<sup>2</sup>.

## 2.2 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La Unidad de Negocio Hidropaute perteneciente a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P. tiene a su cargo la operación de las Centrales Mazar y Molino, como parte del Proyecto Paute Integral, que desde la concepción y los estudios preliminares para el aprovechamiento integral del río Paute se contempló la implantación en cascada de cuatro centrales: Mazar (170MW), Molino (1075MW), Sopladora (487MW) [5], Cardenillo (595MW). La segunda de ellas, esto es la central Molino se construyó en dos fases la fase A-B, con una capacidad de generación de 500 MW, y la fase C con una capacidad de generación de 575 MW.

Como uno de los beneficios de la implementación de la arquitectura del software XA/21<sup>3</sup> en la central Molino resultó la optimización de la producción de generación en las unidades de la fase AB, incrementando 25 MW en total para

<sup>2</sup> Fuente: Celec E.P. unidad de negocio Hidropaute

<sup>3</sup> Software XA/21 de General Electric fue implementado en la central Molino en el año 2007

las cinco unidades [3], por lo que actualmente la central Molino tiene una capacidad de 1100 MW [6].

Como parte esencial de la fase AB se construyó la presa Daniel Palacios formando el embalse Amaluza, para su almacenamiento inicial de 120 millones de metros cúbicos. Actualmente el volumen que se ha dejado de utilizar en el embalse Amaluza durante este tiempo de operación se encuentra entre las cotas 1935 m.s.n.m. (mínima nominal de operación) y 1970 m.s.n.m. (mínima por seguridad operativa por influencia del sedimento depositado y afluente).

Luego de la construcción de la central Molino, se estableció como indispensable la presa Mazar, principalmente por su función reguladora de caudales y por su capacidad para retener los sedimentos que arrastran el río Paute, para su segunda función. Por lo que hace unos pocos años atrás se construyó la presa y la central Mazar con una capacidad de generación de 170 MW; completando en la actualidad 1270 MW de capacidad instalada del complejo hidroeléctrico Paute.

De acuerdo a estudios a nivel de pre factibilidad y factibilidad y otras alternativas planteadas por consultores que fueron contratados por el INECEL y algunos por Hidropaute, sugieren que con el desarrollo integral del recurso se lograría en la construcción de cuatro centrales hidroeléctricas [2], [6], a continuación en la tabla 2.1 se presenta el resumen de la capacidad de las mismas:

Tabla 2. 1 Capacidad de la Centrales Hidroeléctricas del Complejo Paute Integral

<b>CENTRALES DEL COMPLEJO HIDROELECTRICO PAUTE</b>	
Capacidad actual de Paute Molino fases A-B y C	1 100 MW
Capacidad actual Paute Mazar	170 MW
Capacidad futura de Sopladora	487 MW
Capacidad futura Cardenillo	595 MW
<b>TOTAL</b>	<b>2 332 MW</b>

## 2.2.1 CENTRAL MAZAR

### 2.2.1.1 PRESA Y EMBALSE MAZAR

La presa de la central Mazar es de escollera con pantalla de hormigón (CFRD) tiene 166 m de altura, capacidad del embalse en 410 millones de m<sup>3</sup>, el volumen muerto de 180 hm<sup>3</sup> es capaz de alojar los sedimentos durante su vida útil de 50 años, reduciendo el aporte de sedimentos al embalse Amaluza a 0,50 millones de m<sup>3</sup>/año aproximadamente. El sistema de evacuación de crecientes consiste



en dos vertederos independientes libres con una capacidad de  $8550 \text{ m}^3/\text{s}$  en la cota 2163 m.s.n.m. del embalse.



Figura 2. 2 Presa de la central Mazar<sup>4</sup>.

Tabla 2. 2 Características de la Presa y Embalse Mazar

Presa Mazar	
Tipo	CFRD Enrocado con cara de hormigón
Nivel de coronamiento	2 166 m.s.n.m.
Máxima capacidad del vertedero	$8\,550 \text{ m}^3/\text{s}$
<b>Embalse Mazar</b>	
Nivel máximo normal	2 153 m.s.n.m.
Nivel mínimo de operación de la central	2 098 m.s.n.m.
Volumen útil actual a cota 2153 m.s.n.m	$394,1 \text{ hm}^3$
Volumen útil actual a cota 2098 m.s.n.m	$91,5 \text{ hm}^3$

### 2.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CENTRAL MAZAR.

La central Mazar está conformada por dos unidades de generación de 85 MW cada una, el tipo de turbinas utilizadas por esta central son tipo Francis con un caudal de diseño máximo de  $141,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Las turbinas Francis de la central Mazar fueron diseñadas para operar en el rango de alturas brutas comprendidas entre la máxima de 153,50 m y la mínima de 96,60m, correspondientes a la combinación de los varios niveles de agua posibles agua arriba y aguas abajo.

<sup>4</sup> Fuente: Celec E.P. unidad de negocio Hidropaute

La altura neta está dada por la diferencia entre la altura o cota del nivel del embalse menos la altura del nivel de la descarga menos las pérdidas de conducción.

Las pérdidas de carga en el circuito hidráulico de aducción, desde la sección de la entrada del túnel de carga (toma de agua) hasta la sección de la salida del túnel de descarga (aguas arriba de la solera en la Elevación. 2000,50 m.s.n.m.) son calculadas por las expresiones

$$H_{per1} = 0,000459 * Q_T^2 \quad 1 \text{ turbina, } 0 < Q_T \leq 70,55 \frac{m^3}{s} \quad (2.1)$$

$$H_1 = 0,000269 * Q_T^2 \quad 2 \text{ turbinas, } 70,55 < Q_T \leq 141,1 \frac{m^3}{s} \quad (2.2)$$

**Dónde:**

$Q_T$  Caudal total turbinado [ $m^3/s$ ]

$H_{per1}$  Pérdidas de carga [m]

Debido a esta variación en la altura neta, más aun al tratarse de turbinas tipo Francis, éstas se ven directamente afectadas en su rendimiento y por ende en su potencia de salida, de igual manera las unidades de generación acopladas a ellas, a continuación en la figura 2.5 se presenta el rango de operación de las unidades en función de la altura neta.

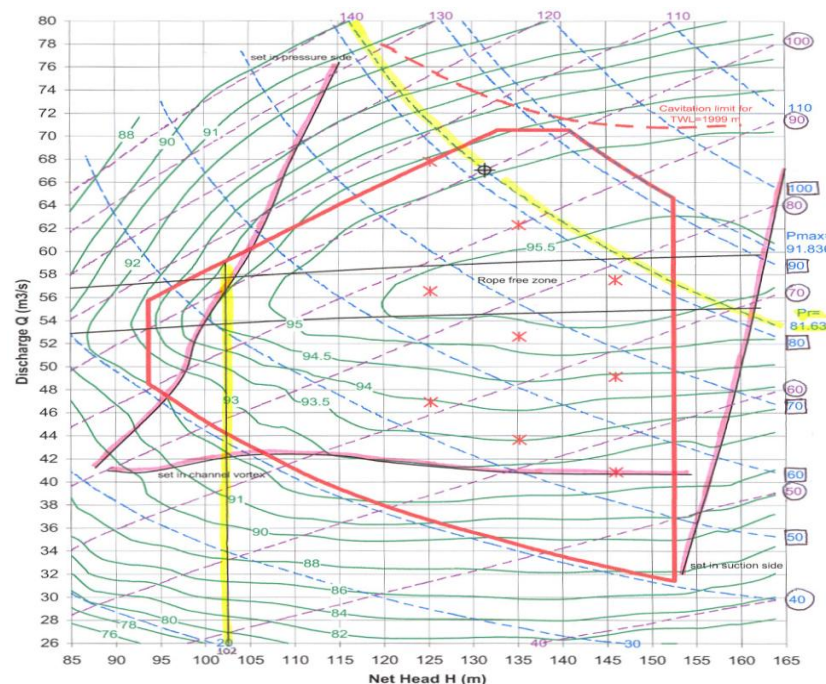


Figura 2. 3 Zona de operación de las unidades de generación de la central Mazar en función de las alturas netas de trabajo<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Fuente: Informe del modelo reducido de la turbina realizado por el fabricante Voith Siemes Hydro Power Generation

En la tabla 2.3 se presenta las características más representativas de la central Mazar

Tabla 2. 3 Características de la central Mazar

Central Mazar	
Tipo de turbina	Francis
Salto útil nominal	153 m
Número de generadores	2
Potencia nominal	85 MW
Potencia Instalada	170 MW
Caudal máximo de turbinamiento	141,1 m <sup>3</sup> /s

En el Anexo A se presentan en detalle las características de la presa y de la central Mazar.

## 2.2.2 CENTRAL MOLINO

### 2.2.2.1 PRESA Y EMBALSE AMALUZA.

La presa Daniel Palacios fue construida como parte de las obras de las fases A-B de la central Molino, es del tipo arco gravedad de hormigón armado y tiene una capacidad de almacenamiento de 120 millones de m<sup>3</sup> con un volumen útil de 100 millones de m<sup>3</sup> (datos iniciales de construcción). El vertedero de excesos tiene una capacidad de descarga de 7 724 m<sup>3</sup>/s [1], [2], [4].



Figura 2. 4 Vista de la Presa Daniel Palacios de la central Molino<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Fuente: Celtec E.P. unidad de negocio Hidropaute

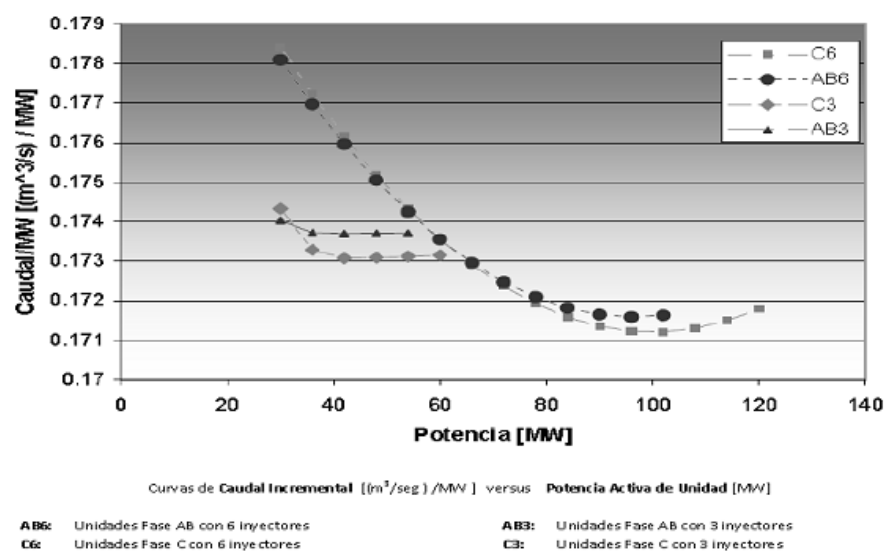
Tabla 2. 4 Características del embalse Amaluza (datos actuales)

Presa Daniel Palacios	
Tipo	Hormigón armado
Nivel de coronamiento	1994 m.s.n.m.
Máxima capacidad del vertedero	7 724 m <sup>3</sup> /s
Embalse Amaluza	
Nivel máximo normal	1 991 m.s.n.m.
Nivel mínimo de operación de la central	1 970 m.s.n.m.
Volumen útil actual a cota 1991 m.s.n.m	69,8 hm <sup>3</sup>
Volumen útil actual a cota 1970 m.s.n.m	28,8 hm <sup>3</sup>

### 2.2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CENTRAL MOLINO.

La central Molino está conformada por 10 unidades de generación distribuidas en dos fases, la Fase AB con 5 unidades de 105 MW cada una, y la Fase C con 5 unidades de 115 MW, el tipo de turbinas utilizadas en la central Molino son tipo Pelton con un caudal de diseño máximo de 205 m<sup>3</sup>/s aproximadamente.

En la central Molino las turbinas Pelton en función de su altura de trabajo también presentan ciertas características que gráficamente se pueden observar en la curva de caudal incremental versus a la potencia de generación de las unidades, Figura 2.5.


Figura 2. 5 Curvas de caudal incremental vs potencia de la unidad<sup>7</sup>

Las pérdidas de carga en el circuito hidráulico de aducción para los túneles de la fase AB y fase C, son calculadas por la expresión

<sup>7</sup> fuente: CCG – central Molino

$$H_{per2} = 0,0035 * Q_T^2 \quad 0 < Q_T \leq 205 \frac{m^3}{s} \quad (2.3)$$

**Donde:**

$Q_T$  Caudal total turbinado [ $m^3/s$ ]

$H_{per2}$  Pérdidas de carga [m]

En la tabla 2.5 indica la características más representativas de la central Molino

Tabla 2. 5 Características de la central Molino

Central Molino	
Tipo de turbina	Pelton
Salto útil nominal	657 m
Número de generadores	10
Potencia nominal	105 MW (5 unidades Fase AB)
	115 MW (5 unidades Fase C)
Potencia Instalada	1 100 MW
Caudal máximo de turbinamiento	205 m <sup>3</sup> /s

En el Anexo B se muestran en detalle las características de la presa Amaluza y de la central Molino.

### 2.2.3 PRODUCCIÓN HISTÓRICA

#### 2.2.3.1 PRODUCCIÓN DE LA CENTRAL MOLINO.

Los datos históricos de la producción hidroeléctrica de la central Paute Molino se encuentran en mayor detalle en el Anexo C.

En términos generales la producción hidroeléctrica de la central Paute Molino data desde agosto del año 1983 (año de operación de las primeras unidades de la Fase A-B) hasta la fecha, y como muestra del registro histórico en la figura 2.6 se presenta la producción de energía de la central Molino.

Un hito importante en la producción de Molino que cabe señalar es la optimización de la generación en las unidades de la fase A-B con la ayuda de la arquitectura de software XA/21 de *General Electric*, mismos que inician su implementación en el año 2007 [3] en la central. Del estadístico se extrae que el año 2008 la producción de energía se ve incrementada por la ampliación de 25 MW<sup>8</sup> en la potencia instalada efectiva de la central y por el buen año hidrológico

<sup>8</sup> La ampliación de 25 MW es debido al incremento del límite operativo de las unidades de la Fase AB en 5 MW (de 100 a 105 MW) sujetas a que la Central Paute este realizando la función de AGC. Esto es posible gracias a que el rodete de estas unidades tiene una potencia de diseño de 112 MW y que el limitante para llegar a esta potencia es el túnel de carga de la Fase AB y el aislamiento térmico de los generadores de estas unidades.



presentado, dicha producción del 2008 hasta la fecha registra el máximo histórico llegando al valor 6285,8 GWh tal como se observa en el Anexo C.

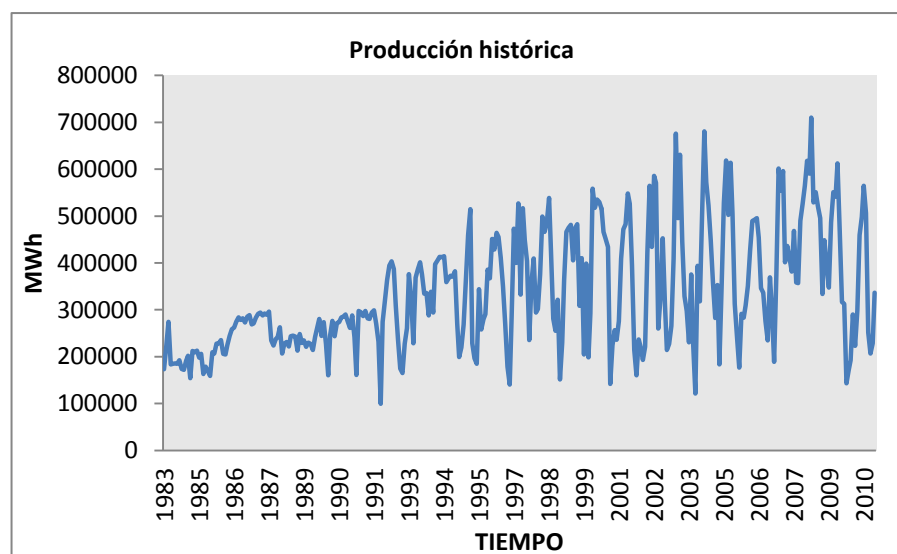


Figura 2. 6 Producción de energía histórica de la central Molino

#### 2.2.3.2 PRODUCCIÓN DE LA CENTRAL MAZAR.

En relación a la gestión energética del Ecuador el año 2010 marcó un hito importante al concretarse una de las obras de trascendencia en el país como es la terminación de la construcción de la central hidroeléctrica Paute-Mazar. Mazar inició su operación en el mes de julio con la operación experimental de la unidad 01 y posteriormente en el mes de diciembre la unidad 02.

Bajo este antecedente de operación y debido a que las firmas constructoras realizan todavía pruebas en las unidades y en ciertos sistemas de la central, traen como consecuencia una operación atípica normal dentro los primeros años de funcionamiento, razón por la cual no se presenta a gran detalle el histórico de la producción registrada en la central Paute Mazar.

La producción total de energía de la central, en el año 2010, fue 262,7 GWh que representa un 6,08% de la producción de la Unidad de Negocio Hidropaute en el año 2010 (4 316,62 GWh). Con esta producción se inicia el registro estadístico de la generación de la central Mazar, en el Anexo D se presenta la tabla con los registros mencionados.

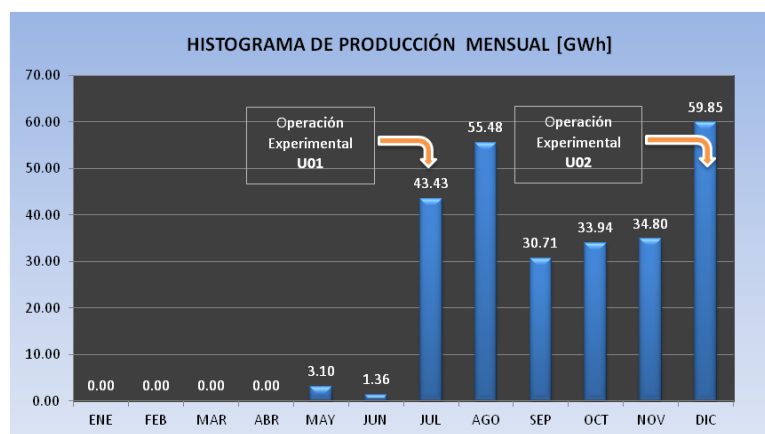


Figura 2. 7 Histograma de producción de energía bruta mensual de la Central Paute – Mazar del año 2010<sup>9</sup>

## 2.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

### 2.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.

La cuenca hidrográfica del río Paute se localiza en la región centro sur del Ecuador, y forma parte de la cuenca del Santiago-Namangoza, que es a su vez parte integral de la cuenca del río Amazonas. Se ubica entre los paralelos 2°15' y 3°15' de latitud sur y entre los meridianos 78°30' y 79°20' latitud oeste. Su extensión hasta el embalse Amaluza es de 5 186 km<sup>2</sup>.

La zona política y administrativa la cuenca abarca parte de tres provincias Azuay, Cañar y Morona Santiago, en el Azuay (82%) se encuentra distribuida en su capital Cuenca y los cantones Paute, Gualaceo y Sigsig, por su parte en la provincia de Cañar (12%) por los cantones Biblián y Azogues, el restante (6%) corresponde a la provincia de Morona Santiago.

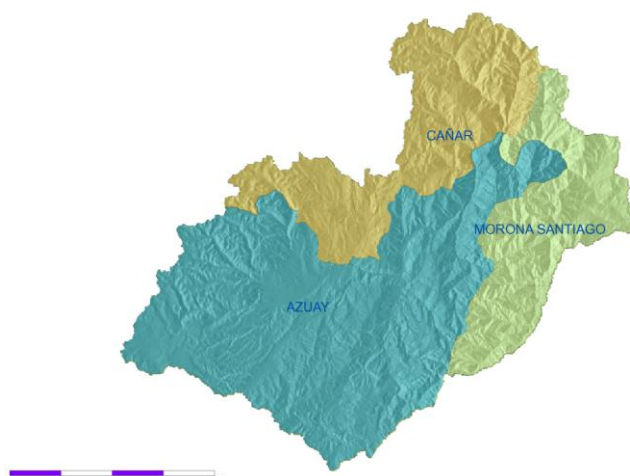


Figura 2. 8 Zona administrativa y política de la cuenca del Paute<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Fuente: informe anual 2010 de la central Mazar [10], [16]

<sup>10</sup> Fuente: Universidad del Azuay, IERSE [8]

El Río Paute, drenaje principal de la cuenca hidrográfica del mismo nombre donde está asentada la central más grande del país, nace en los páramos del Cajas y Soldados, con los ríos Yanuncay, Tomebamba, Tarqui y Machángara los cuales confluyen en la ciudad de Cuenca, recibiendo luego las aguas de los ríos Burgay, Jadán, Gualaceo y Cutilcay, así como otras corrientes menores. En la parte baja reciben las aguas de seis subcuencas importantes que son los ríos Collay, Pindilig, Mazar, Llavircay, Juval y Pulpito, y caudales naturales de menor importancia, hasta llegar al embalse Amaluza. A partir de éste, se alimenta del Río Negro, Sopladora, Cardenillo, Palmira, Bomboiza, hasta llegar a la ciudad de Méndez, en donde aguas abajo se une con los ríos Negro y Upano formando el río Namangoza.

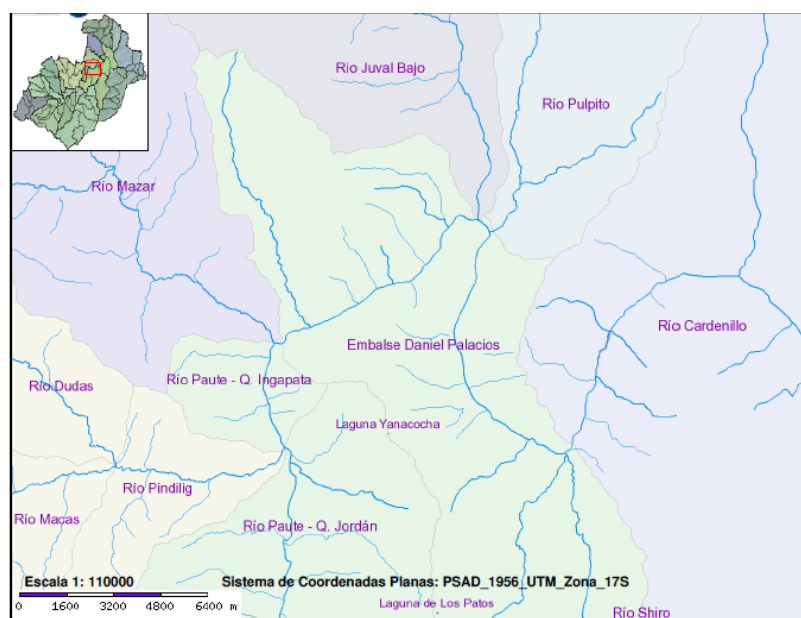


Figura 2. 9 Cuencas que aportan al complejo hidroeléctrico Paute integral<sup>11</sup>

El régimen de la cuenca es claramente oriental, con períodos de estiaje entre los meses de octubre y marzo y periodos lluviosos entre abril y septiembre.

La precipitación media anual en la cuenca varía desde 1 300 mm por año en las cabeceras, hasta 1 950 mm por año en la cuenca baja.

## 2.4 ANÁLISIS DE SERIES HISTÓRICAS

El resultado de la gestión de un sistema de recursos hídricos depende en gran parte de los caudales se suponga va afrontar el sistema en su vida “económica”. [11], [12] Por tal razón la historia de las aportaciones hidrológicas (caudales históricos) de un sistema permiten evaluar el comportamiento futuro del río o de

<sup>11</sup> Fuente: Universidad del Azuay, IERSE [8]



la cuenca, más aún en la operación de embalses ya que el caudal de entrada o aportación de ingreso es uno de los datos históricos de mayor interés en el análisis de reservorios situados en una misma cuenca [14], [16], [17].

En el Ecuador, tradicionalmente los modelos para la incertidumbre hidrológica usados en el sector eléctrico, utilizan para su construcción la información contenida de una base de datos que almacena el registro histórico de los caudales afluentes semanales promedio, para cada uno de los aprovechamientos del SNI, aproximadamente durante un período de 47 años en algunos casos.

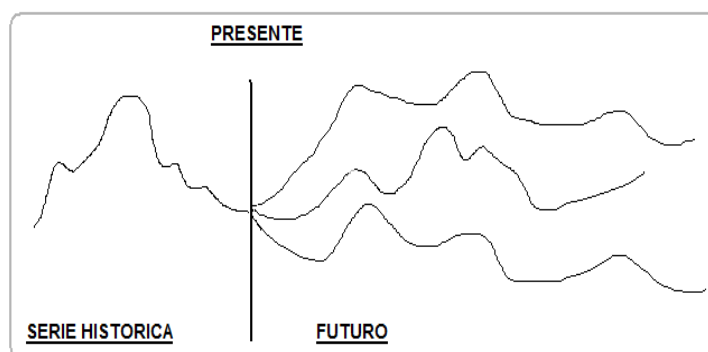


Figura 2. 10 Representación de caudales de ingreso en el tiempo

Para el caso particular del complejo hidroeléctrico Paute los registros históricos contienen información a partir del año de 1964, y por las características actuales del complejo, es necesario realizar el análisis de las series históricas de los caudales entrantes a los embalses, más aún por la formación del embalse Mazar en la cuenca del Paute a partir del año 2010.

#### 2.4.1 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES ENTRANTES A LA ZONA DEL EMBALSE AMALUZA

Actualmente la estadística utilizada por el CENACE en el SNI contiene la información de caudales entre los años de 1964 al 2010<sup>12</sup>, básicamente determinados por los registros históricos del caudal de la cuenca del Paute al ingreso del embalse Amaluza [13], registrados esencialmente por el ex INECEL, y por Hidropaute.

En el Anexo E se presenta los registros históricos de los caudales medios mensuales desde el año 1964 hasta el 2010 del embalse Amaluza; embalse que se ve influenciado por dos épocas estacionales bien marcadas, la primera época se registra desde el mes de Octubre que es el inicio de la época estacional seca

<sup>12</sup> Los análisis de esta sección y subsiguientes se ha considerado hasta el año 2010 debido que a mediados de este periodo inicio la operación del embalse y de la central Mazar.

y termina en Marzo, la segunda corresponde a la época estacional lluviosa que se inicia en Abril y termina en Septiembre.

De la información del Anexo E se construyó una serie histórica con los valores de los caudales medios anuales entrantes a la zona del embalse desde el año 1964.

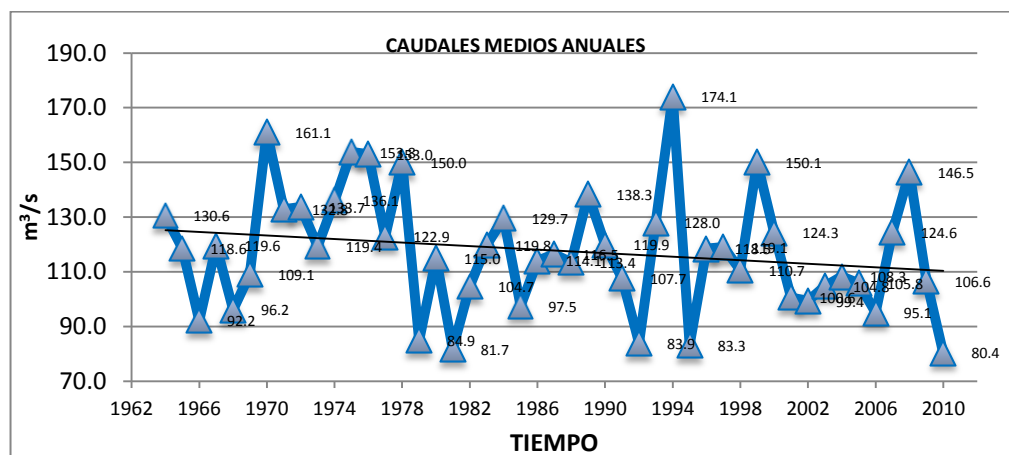


Figura 2. 11 Caudales medios anuales de la zona del embalse Amaluza<sup>13</sup>

El estudio de la serie de datos construida con los caudales anuales medios entrantes, permitió conocer el comportamiento de los caudales aportados de acuerdo a cada año hidrológico (extra seco, seco, medio, húmedo y extra húmedo), estableciéndose una media de caudal de la serie histórica de 117,8 m<sup>3</sup>/s.

La serie del embalse Amaluza manifiesta una tendencia lineal de pendiente negativa muy suave y una componente estacional preponderante sin que se observe comportamiento cíclico ni componente irregular. Este análisis permitió establecer una medida del promedio de la estacionalidad en cada periodo.

#### 2.4.2 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES ENTRANTES SITIO DE PRESA MAZAR

Los caudales correspondientes al sitio de presa Mazar-Ingapata se han estimado en estudios hidrológicos preliminares realizados ya sea por la unidad de hidrología del INECCEL así como empresas consultoras para Hidropaute [9], [13].

En el Anexo F se presenta los registros históricos de los caudales medios mensuales desde el año 1964 hasta el 2010. De igual manera en el sitio de

<sup>13</sup> Fuente: Investigación propia.

presa Mazar – Ingapata también se ve influenciado por las dos épocas estacionales tal como se apreció para el embalse Amaluza.

De igual manera se construyó una serie histórica con los valores de los caudales medios anuales en el sitio de presa Mazar-Ingapata desde el año 1964.

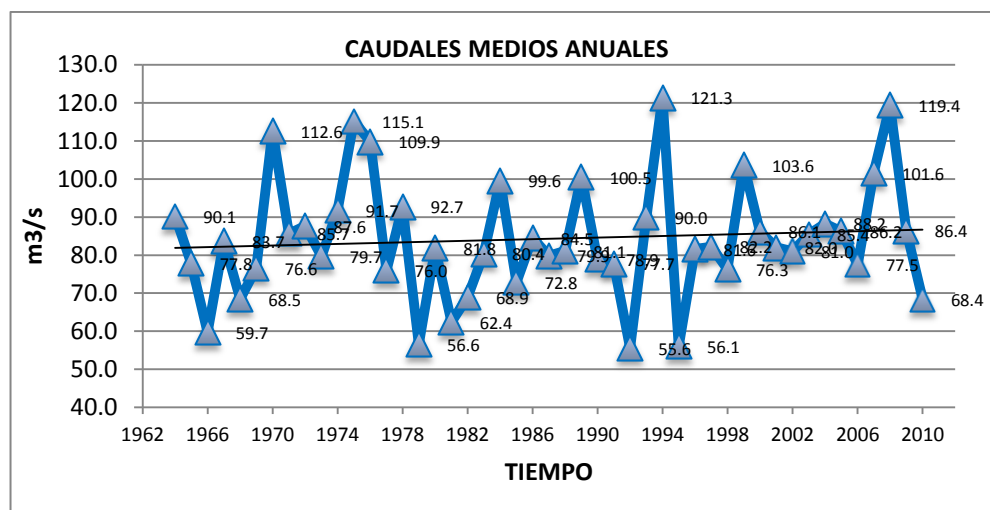


Figura 2. 12 Caudales medios anuales del sitio de presa Mazar<sup>14</sup>

El estudio de la serie de datos construida con los caudales medios entrantes, al sitio de presa Mazar permitió conocer el comportamiento de los caudales aportados de acuerdo a cada año hidrológico (extra seco, seco, medio, húmedo y extra húmedo). De igual manera se determinó el caudal medio anual de la serie que esta alrededor de  $84,3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La serie manifiesta una tendencia lineal de pendiente positiva suave y una componente estacional preponderante sin que se observe comportamiento cíclico ni componente irregular. Este análisis permitió establecer una medida del promedio de la estacionalidad en cada periodo.

#### 2.4.3 SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES LATERALES ENTRANTES AL EMBALSE AMALUZA

Después de haber concluido la construcción de la presa y central Mazar e iniciar la operación en el año de 2010, se ve la necesidad de considerar los caudales entrantes al embalse Amaluza debido a los afluentes laterales que se encuentran aguas abajo entre el pie de la presa Mazar y la presa Daniel Palacios.

<sup>14</sup> Fuente: Investigación propia

De acuerdo a informes de hidrología entre las subcuencas más importantes en esta zona están las de Mazar, Llavircay, Juval y Pulpito [2], así como también pequeñas vertientes y quebradas, que para motivo de análisis y desarrollo del modelo motivo de esta tesis se conocerán a todas las subcuencas descritas anteriormente como *aportaciones laterales*.

Los caudales que se presentan en este análisis son caudales históricos y han sido estimados en varios estudios anteriores, los mismos han sido realizados ya sea por aforos líquidos medidos en algunas estaciones hidrométricas así como calculados a base de la operación de la central Molino [13].

En el Anexo G se presenta los registros históricos de los caudales laterales medios mensuales entrantes al sitio del embalse Amaluza desde el año 1964 hasta el año 2010.

Continuando con el análisis se construyó la serie histórica con los valores de los caudales laterales medios anuales entrantes al sitio del embalse Amaluza desde el año 1964, gráficamente se pueden apreciar lo valores mencionados en la figura 2.25.

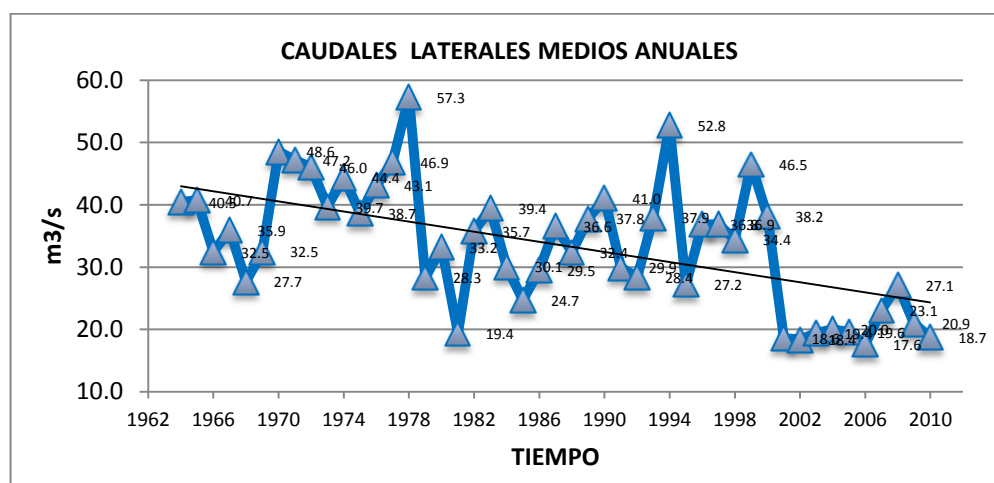


Figura 2. 13 Caudales laterales medios anuales entrantes al sitio del embalse Amaluza<sup>15</sup>

El estudio de la serie de datos construida con los caudales laterales medios entrantes, permitió conocer el comportamiento de los caudales aportados de acuerdo a cada año hidrológico, en particular, se ve claramente que existe en los últimos años caudales mínimos preponderantes que hacen que se encuentren dichos años en los llamados años hidrológicos extra secos.

<sup>15</sup> Fuente: Investigación propia

La serie manifiesta una tendencia lineal de pendiente negativa pronunciada y una componente estacional preponderante sin que se observe comportamiento cíclico ni componente irregular.

#### **2.4.4 ESTADISTICA DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE CAUDALES**

El análisis estadístico que se realiza a las series históricas de caudales de ingreso para el embalse Amaluza, el sitio de presa Mazar y aportaciones laterales al embalse Amaluza tiene el objeto de obtener ciertas características particulares de dichas series [17], [18], los parámetros calculados dentro del análisis son: Valor promedio, Desviación estándar, Coeficiente de variación, Rango de variación. En el Anexo H se muestran los resultados indicados.

## CAPITULO III

### PROGRAMACIÓN DINÁMICA

#### 3.1 INTRODUCCION

“La esencia de la aplicación de análisis de sistemas en operación de embalses es el desarrollo de modelos matemáticos que pueden ser usados para encontrar las mejores políticas de operación del embalse, la regla de operación, entre muchas políticas alternativas. Estas políticas pueden ser desarrolladas dentro de dos contextos: diseño y operación”.

Durante los últimos años, uno de los más importantes avances dentro del campo de la ingeniería de los embalses de recurso hídricos ha sido el desarrollo y adaptación de técnicas de optimización para el planeamiento, diseño y manejo de los sistemas o complejos de embalses. El análisis de un sistema de embalses puede envolver cientos de variables de decisión como de restricciones, en la mayoría de los problemas de recursos de agua se trata de determinar los valores óptimos de las variables de decisión [30].

##### 3.1.1 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN Y BÚSQUEDA

Dentro de la considerable literatura consultada sujeta a la optimización de la operación de embalses muestra que no existe un algoritmo general para su implementación [31], [32], debido al desarrollo de varias aplicaciones de técnicas de optimización. El método o cambios del desarrollo de la técnica utilizada dependen de las características del sistema de embalses, consideraciones de disponibilidad de información, objetivos y restricciones del sistema básicamente.

En general los métodos utilizados y disponibles en la literatura pueden ser: Programación lineal, Programación Dinámica (DP), Programación No-lineal (NLP), Metaheurísticos, Algoritmos genéticos, Simulated Annealing, métodos Fuzzy y Neuro Fuzzy, Inteligencia artificial, Redes Neuronales, etc. Es decir existe una gama de metodologías que de una u otra forma ayudan a resolver el problema del manejo de los embalses más aún cuando se trata de múltiples embalses en una misma cuenca; a continuación se presentan algunas sugerencias al lector para que pueda realizar una revisión de la literatura en [30], [31], [32], [33] [34], [35], [36], [37], [38] de ser el caso.

Una de las técnicas más utilizadas y que ha dado buenos resultados por la conveniencia de solución para este tipo de problemas es la Programación Dinámica, es por eso que esta tesis opta por emplear este tipo de técnica en la resolución del problema de largo plazo de la operación de los embalses del complejo Paute, es así que este capítulo se centra en detallar el principio de la programación dinámica (DP) y su aplicación de esta técnica en el manejo y operación de embalses.

## 3.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA

### 3.2.1 DEFINICIÓN

La estrategia algorítmica conocida como programación dinámica es una técnica orientada a la solución de problemas con decisiones secuenciales en etapas sucesivas donde se debe minimizar o maximizar la contribución de dichas decisiones (función objetivo). Es decir el tipo de problemas abordables principalmente son aquellos en que las soluciones factibles se pueden descomponer en una secuencia de elementos, y cuya función objetivo satisface cierta condición de separabilidad, monótona y de naturaleza recursiva [39].

La idea de la función recursiva es poder atacar un problema global de optimización de  $n$  etapas en  $n$  problemas de optimización de una sola etapa.

Tal enfoque permite a los analistas tomar decisiones etapa por etapa, hasta que el resultado final se obtiene.

Por lo tanto el problema original tiene que ser descompuesto en subproblemas y cada subproblema se conoce como una etapa. Esta descomposición se puede definir en el espacio o en el tiempo. Cada etapa se caracteriza por diferentes estados del sistema expresada por el valor numérico de la variable(s) de estado seleccionada.

La transición del estado de una etapa a otra se expresa en un determinado curso de acción (o la decisión de qué hacer), que está representado por una variable de decisión. Los cambios de estado del sistema influenciados por la decisión adoptada en la etapa anterior son descritos por la ecuación de transformación del Estado [40].

Esta transición del Estado sólo es posible si se siguen ciertas reglas, tanto el estado del sistema y la variable de decisión puede tomar valores dentro de los dominios en particular. Estos límites forman un conjunto de restricciones que deben cumplirse en cada etapa durante el proceso de optimización.

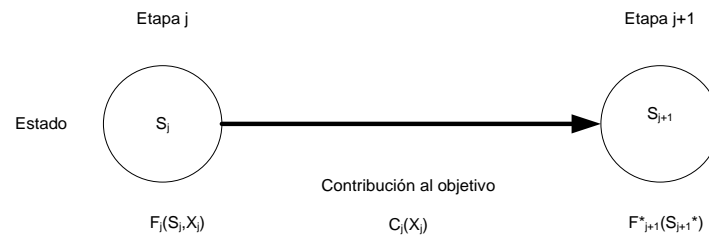


Figura 3. 14 Esquema de la ecuación recursiva de Bellman

La rutina computacional que deriva a la política óptima sigue la ecuación recursiva de Richard Bellman [41] que esquemáticamente se muestra en la figura 3.14. El principio de Richard Bellman de optimalidad [41] dice:

*“En una secuencia de decisiones óptima toda subsecuencia ha de ser también óptima”.*

Esto indica que si las decisiones que hacen falta por tomar en un sistema no son óptimas, entonces toda la política de decisiones tampoco es óptima.

Esto puede ser resuelto por el movimiento hacia adelante (Programación Dinámica Forward) o por el movimiento hacia atrás (Programación Dinámica Backward), etapa por etapa.

**Programación dinámica Forward.**- Se trata de encontrar la solución del problema partiendo de la primera etapa hasta la última etapa, reconociendo las mejores decisiones en cada una de ellas, para posteriormente ir identificando las rutas óptimas desde la última a la primera etapa.

**Programación dinámica Backward.**- La solución del problema se encuentra iniciando el movimiento desde la última etapa a la primera etapa, reconociendo las mejores decisiones en cada una de ellas, para posteriormente ir identificando las rutas óptimas desde la primera a la última etapa.

Es necesario mencionar que la Programación Dinámica no posee una formulación específica, pero sí de notaciones comunes para su resolución, notaciones que se pueden observar en detalle en el Anexo I.

El método de resolución descrito como Programación Dinámica tiene una muy buena aplicación en la resolución de problemas de optimización principalmente para el tipo de problemas donde involucran decisiones secuenciales, como por ejemplo, en los sistemas de recursos hídricos y en particular en la operación de embalses, debido que en este tipo de problemas se pueden presentar distintas



soluciones, cada una con un valor distinto, y lo que se desea es encontrar la solución de valor óptimo (máximo o mínimo) de las variables de decisión.

### 3.2.1.1 PROGRAMACIÓN DINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

La mayoría de los problemas operacionales de los recursos hídricos tienen una estructura especial que facilita su solución, esto ocurre porque las decisiones son llevadas a cabo en una forma secuencial en tiempo o espacio [44].

De manera general como en todo problema de optimización con programación dinámica, se procede a formular el problema en el formato general, primeramente se define las etapas secuenciales del problema, para un embalse típico las etapas pueden ser los periodos mensuales de tiempo en el horizonte operacional. Posteriormente se necesita separar las variables del problema en variables de estado y de decisión o control. Las variables de decisión son independientes, las variables de estado son dependientes y su valor es determinado por la variable de decisión independiente y la de estado en el estado anterior.

El comportamiento u operación óptima de un embalse durante el horizonte de planificación de  $T$  periodos de tiempo (por ejemplo los meses en una planificación de largo plazo) se define como aquellos estados del sistema (estados de volumen o nivel del embalse) para esos  $T$  periodos de tiempo (meses) que minimizan o maximizan cierta función objetivo (beneficios o penalizaciones). La operación óptima de un embalse es pues una herramienta que sirve para definir de una forma más racional la regla de operación del mismo. La regla de operación de un embalse representa el criterio con que se debe usar el recurso hídrico del embalse.

Para ilustrar lo descrito en el párrafo anterior la figura 3.15 muestra un ejemplo de la característica secuencial en los recursos de agua, que se explica brevemente a continuación.

Al inicio de enero existe un cierto nivel o cota del agua en el embalse, se decide luego descargar una cierta cantidad durante este mes. Los vertimientos o crecidas naturales y pérdidas durante este mes, combinadas con las descargas controladas, originan un nuevo nivel de almacenamiento al final de enero o inicios del mes de febrero.

Dependiendo del tipo de problema se incurren en ciertos beneficios, costos, penalizaciones, etc., estos están relacionados a la decisión de cuanto descargar y al almacenamiento promedio del mes en el embalse. Con un nuevo volumen a

inicios de febrero, una nueva decisión de descargar ó almacenar agua es tomada y así sucesivamente para los meses restantes durante el horizonte de planificación en este ejemplo un año.

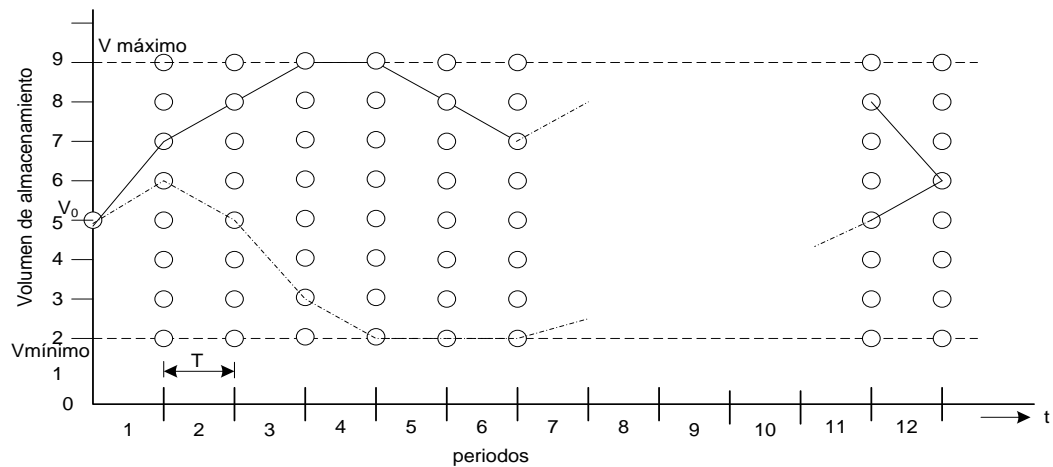


Figura 3. 15 Trayectorias factibles de operación de un embalse<sup>16</sup>

A pesar que las decisiones son tomadas una a la vez, no son independientes entre ellas.

### 3.2.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA DETERMINÍSTICA

Los problemas determinísticos de programación dinámica son aquellos en los cuales el estado asociado en la etapa siguiente está totalmente determinado por el estado y la política de decisión de la etapa actual, por ejemplo, para un embalse el volumen o cota en un determinado mes.

Una manera de catalogar los problemas de programación dinámica determinística es por la forma de la función objetivo. Por ejemplo, el objetivo podría ser minimizar la suma de contribuciones de las etapas individuales, o bien minimizar un producto de tales términos y así sucesivamente [42]. La programación dinámica determinística puede ser discreta o continua; en el primer caso la variable de estado es discretizada en un número finito de valores y en el segundo caso se utilizan métodos matemáticos o de búsqueda para encontrar solución al problema [30].

Por ejemplo para el problema de recursos hídricos este puede ser resuelto utilizando este tipo de metodología, donde primeramente el problema debe ser ajustado al formato general de un proceso de decisión de múltiples etapas tal

<sup>16</sup> Fuente: Diagrama adaptado de A.J. Wood, B.F. Wollenberg [33]

como se mencionó en el apartado anterior, estableciendo también el tipo de movimiento a utilizar Forward o Backward.

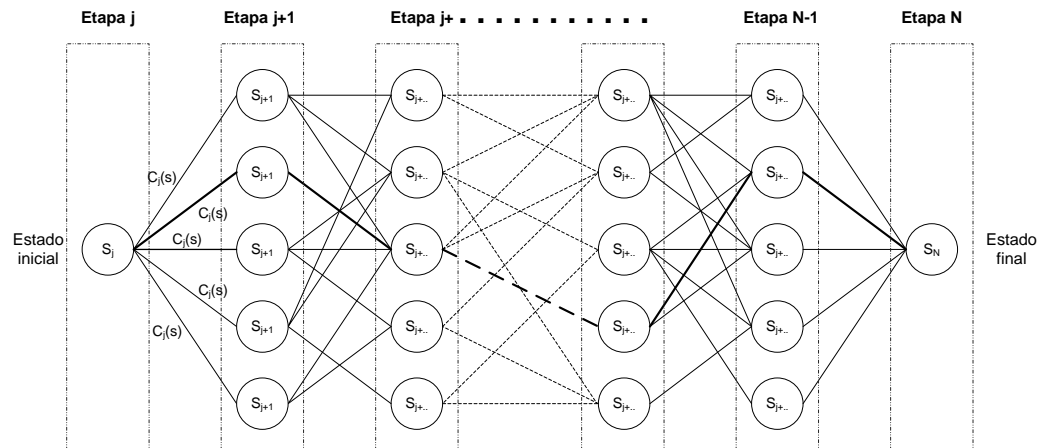


Figura 3. 16 Estructura básica de la programación dinámica determinista

La figura 3.16 describe el funcionamiento de la programación dinámica determinística, de esta figura se extrae lo siguiente:

- La variable de estado ha sido discretizada, los círculos representan estos valores, para el caso del embalse estos estados serían los volúmenes o cotas.
- Para cada etapa existen restricciones, estas restricciones han sido impuestas durante la formulación del problema, esto quiere decir que existe trayectorias factibles de una etapa a otra, en cada estado, estas trayectorias son mostradas gráficamente como líneas en la figura 3.16 Para el ejemplo de los embalses estas restricciones podrían ser el volumen de almacenamiento, vertimiento, descargas, etc.
- Existe N etapas en cada una de las cuales una decisión debe ser tomada, es decir un periodo operativo, por ejemplo un año para el largo plazo dividido en 12 meses.
- Cada decisión en cada etapa hay una función de retorno que evalúa la bondad de esa decisión, y traerá consigo una contribución  $C_j(s)$  que esa decisión puede tener sobre el objetivo general
- Si se utiliza el movimiento hacia atrás (Backward) se empieza en la etapa N (último mes), la decisión óptima en esta etapa es sólo afectada por el estado de entrada al sistema en esa etapa y por la decisión tomada en ella, para el caso del ejemplo podría ser, tomar la decisión de utilizar o no el agua del embalse.

- La etapa N-1 sólo afecta el estado de entrada a la etapa N, y la decisión óptima en esta etapa es sólo gobernada por el estado del sistema en esta etapa y por la decisión tomada en ella
- La etapa N-2 sólo afecta el estado de entrada a la etapa N-1 que a su vez afecta la decisión en la etapa N. la decisión óptima en la etapa N-2 sólo depende del estado del sistema en esta etapa de la decisión tomada en ella
- Lo mismo se puede describir para las etapas restantes hasta la etapa j (mes inicial).
- Si el valor del estado en la etapa j es conocido como en este caso del ejemplo volumen o cota inicial del embalse, el problema para esta etapa sólo tiene que ser solucionado una vez. Para el valor de estado de la etapa j hay que determinar el valor de estado de la etapa j+1 que minimice o maximice la función objetivo que no es más que las combinaciones de las decisiones óptimas en cada etapa.

Gráficamente la resolución del problema con Programación Dinámica Determinista se encuentra la “trayectoria óptima” que es representada en la figura 3.17.

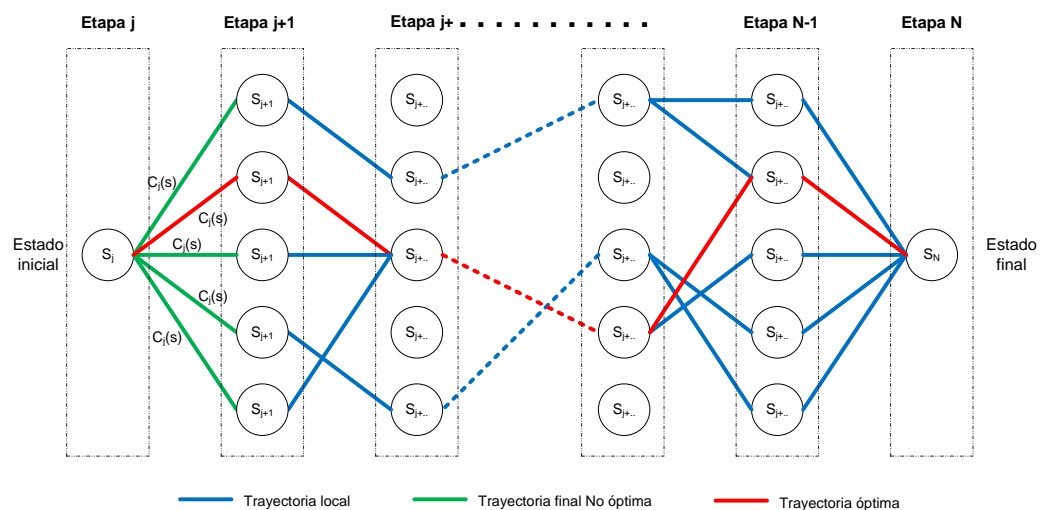


Figura 3. 17 Trayectoria óptima con programación dinámica determinista

### 3.2.3 PROGRAMACIÓN DINÁMICA ESTOCÁSTICA

La programación dinámica probabilística difiere de la programación dinámica determinística en que el estado de la etapa siguiente no queda completamente determinado por el estado y la decisión de la política en el estado actual. En

lugar de ello existe una distribución de probabilidad para lo que será el estado siguiente. Sin embargo, esta distribución de probabilidad todavía está completamente determinada por el estado y la decisión de la política del estado actual [40].

En la siguiente figura se describe diagramáticamente la estructura básica que resulta para la programación dinámica probabilística, en donde  $N$  denota el número de estados posibles en la etapa  $j+1$ . Cuando se desarrolla de esta forma para incluir todos los estados y decisiones posibles en todas las etapas, a veces recibe el nombre de árbol de decisión. Si el árbol de decisión no es demasiado grande, proporciona una manera útil de resumir las diversas posibilidades que pueden ocurrir.

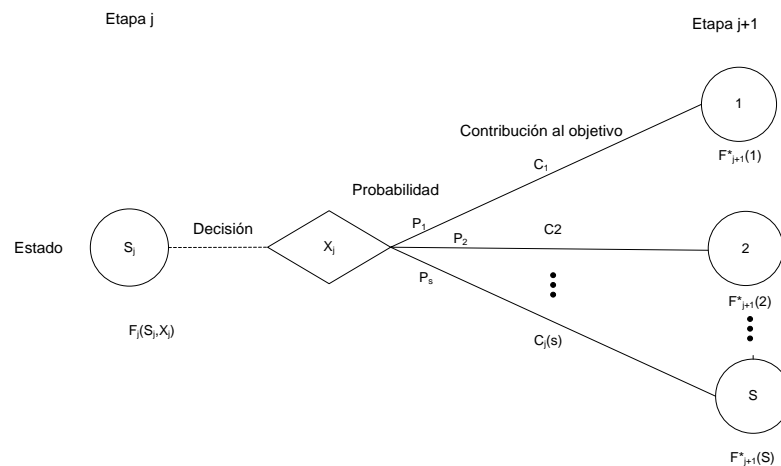


Figura 3. 18 Estructura básica de la programación dinámica estocástica

Para los problemas de recursos hídricos por ejemplo, la incertidumbre hidrológica de caudales está explícitamente tomada en consideración en el modelo de programación dinámica estocástica (SDP). Estos modelos incorporan las distribuciones discretas de probabilidad en el proceso de optimización [30], que describen el grado de incertidumbre de los sucesos futuros de los caudales y las correlaciones de los caudales en tiempo y espacio que puede estar presente entre las series de caudales de tiempo para diferentes embalses del mismo sistema de recursos hídricos.

### 3.2.4 LA DIMENSIONALIDAD

Con el objeto de resolver problemas de programación dinámica multidimensionales más aún en los sistemas de recursos hídricos se deben encontrar formas de reducir la carga computacional, representada por la cantidad de discretizaciones elevada a la potencia del número de variables de

estado a ser considerados en cada etapa (maldición de la dimensionalidad) [41], [43]. De la literatura consultada existen dos maneras de hacerlo:

- Reducir la cantidad de discretizaciones de las variables de estado
- Reducir el número de variables de estado

En cualquiera de los casos siempre hay un precio que pagar; no se aseguran los resultados óptimos globales.

### 3.2.5 EL MÉTODO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA INCREMENTAL

Debido que esta técnica ataca los problemas de dimensionalidad y reduce los tiempos computacionales se aprovecha estas características para el desarrollo de esta tesis, por lo tanto se trata en esta sección de explicar en detalle el método de programación dinámica incremental, para esto se presenta en la figura 3.19 el diagrama de flujo básico de la programación dinámica incremental.

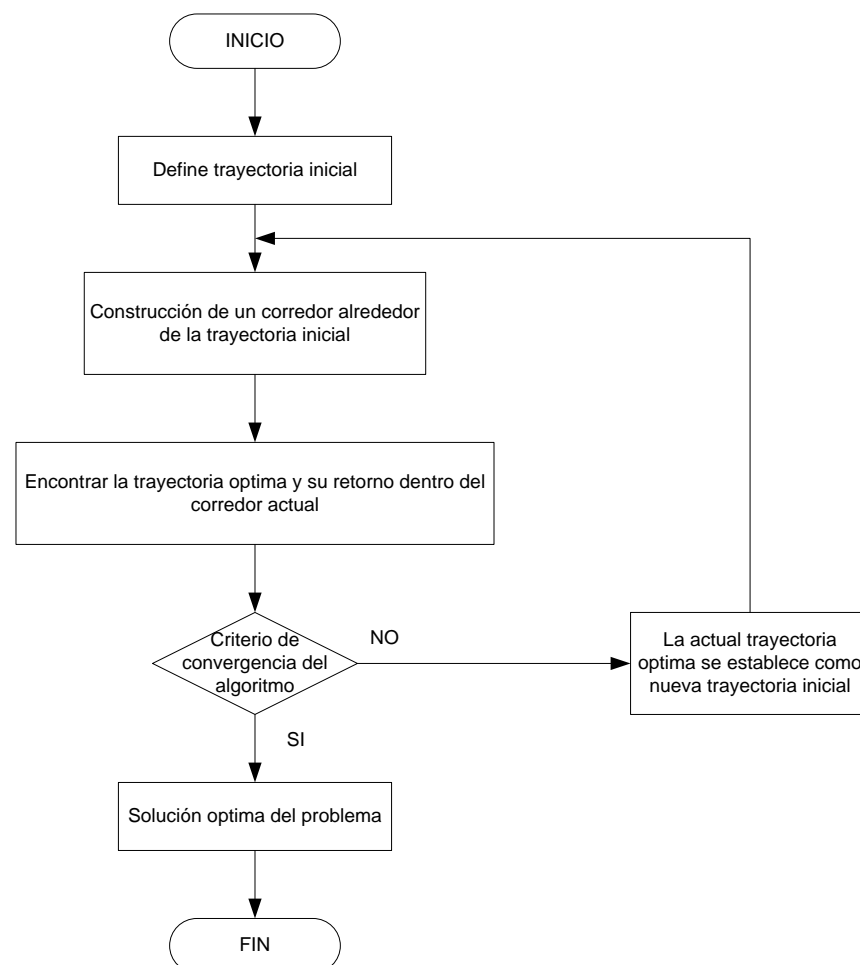


Figura 3. 19 Diagrama de flujo base de la Programación dinámica incremental<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Fuente: Diagrama adaptado de K.D.W. Nandalal and Janos J. Bogardi [45]

En términos generales la programación dinámica incremental utiliza la ecuación recursiva de la programación dinámica para buscar una trayectoria mejorada iniciando con una trayectoria inicial de prueba. La trayectoria mejorada es entonces buscada en un rango pre-establecido definido como “corredor”. El ciclo computacional es completado cuando el proceso de búsqueda convergió en una trayectoria óptima de acuerdo a un criterio de convergencia pre-especificado. Es necesario nuevas iteraciones cuando este criterio no se satisface. Para la siguiente iteración la trayectoria mejorada obtenida de la iteración previa sirve como nueva trayectoria inicial de prueba.

La Programación Dinámica Incremental inicia con la definición de la trayectoria inicial de prueba, por ejemplo un criterio dentro de la literatura consultada en [45] la trayectoria inicial de prueba es tomada heurísticamente de la operación histórica del embalse, (la trayectoria inicial debe ser factible ya que debe satisfacer las restricciones del problema). Se define trayectoria a la secuencia de transformaciones admisibles de la variable de estado para cada etapa a lo largo de todo el periodo de estudio, en este caso la variable de estado es el nivel del embalse.

En la figura 3.20 se ha trazado una trayectoria inicial de prueba como una línea continua (azul) pero en la realidad está compuesta por un número finito de puntos.

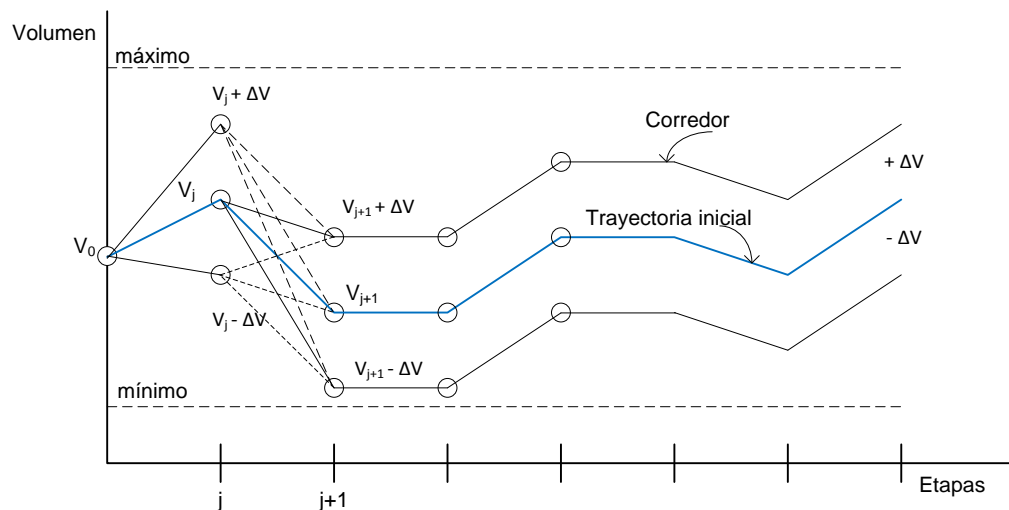


Figura 3. 20 Diagrama del método programación dinámica incremental

Posteriormente se construye un corredor alrededor de la trayectoria inicial el cual se ubicará a un nivel de intervalo discreto  $\Delta v$ , este corredor debe encontrarse

dentro de los límites factibles de la variable de estado (por ejemplo volumen máximo y mínimo del embalse), el intervalo es función de la precisión de la solución final, siendo aconsejable definir el corredor con un ancho suficientemente grande para cubrir un rango considerable de posibles volúmenes de almacenamiento. En general, los corredores anchos alrededor de la trayectoria de prueba inicial provocan que la solución óptima requiera de un pequeño número de iteraciones pero con la salvedad de que la trayectoria no sea óptima, esto posteriormente dentro del proceso iterativo se resuelve con la reducción del ancho del corredor.

El corredor especifica los valores de la variable de estado a ser considerados en cada paso del proceso de optimización. En general, un corredor para un sistema de un solo embalse consiste en tres variables de estado definidas simétricamente alrededor de la trayectoria inicial [45]. Es decir para cada etapa existen ahora tres valores discretos simétricos para cada componente del vector de estado  $j$ , tal que el número de combinaciones para la resolución del problema será  $3^m$ . Tomando como ejemplo la gráfica anterior los valores de estado para la primera etapa son:  $V_j + \Delta v$ ,  $V_j$  y  $V_j - \Delta v$ , siendo estos el valor superior del corredor, valor de la variable de estado inicial y valor inferior del corredor respectivamente.

Después de la construcción del corredor alrededor de la trayectoria inicial se soluciona el problema usando la ecuación recursiva del método de programación dinámica convencional, pero restringido computacionalmente a los valores de las variables de estado delimitadas por el ancho del corredor, es decir después de la construcción de un corredor alrededor de la trayectoria inicial, la trayectoria mejorada y el correspondiente valor de la función objetivo son buscados dentro del corredor.

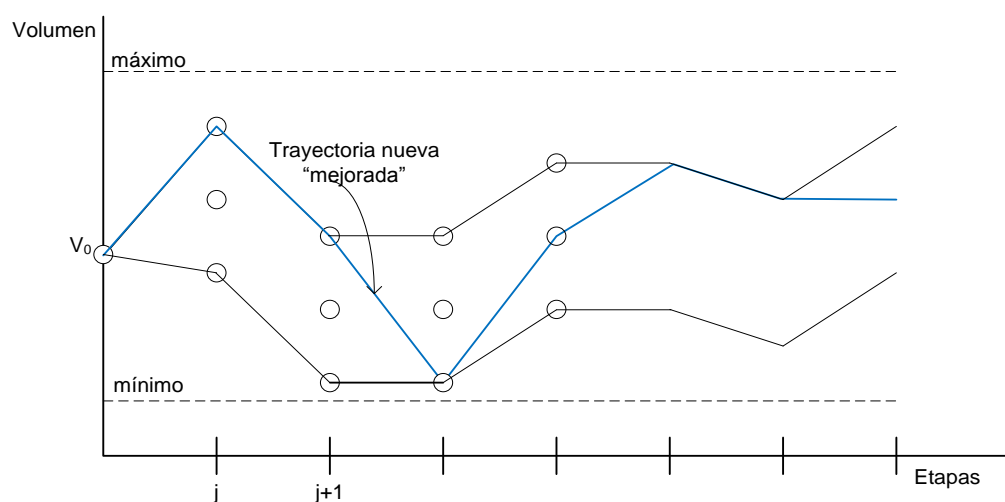


Figura 3. 21 Trayectoria nueva del método programación dinámica incremental



Posteriormente después de encontrar la trayectoria “mejorada” esta es retornada como la nueva trayectoria actual “inicial” y este proceso iterativo es realizado hasta que se cumpla el criterio de convergencia, criterio que es explicado más adelante.

Según como avance el proceso iterativo el ancho del corredor se va reduciendo progresivamente, por ejemplo si la solución final mejorada “óptima” es como la indicada en la figura 3.21, se puede definir un nuevo corredor “reducido” alrededor de ella con un valor de  $\Delta v$  más pequeño esto gráficamente es mostrado en la figura 3.22

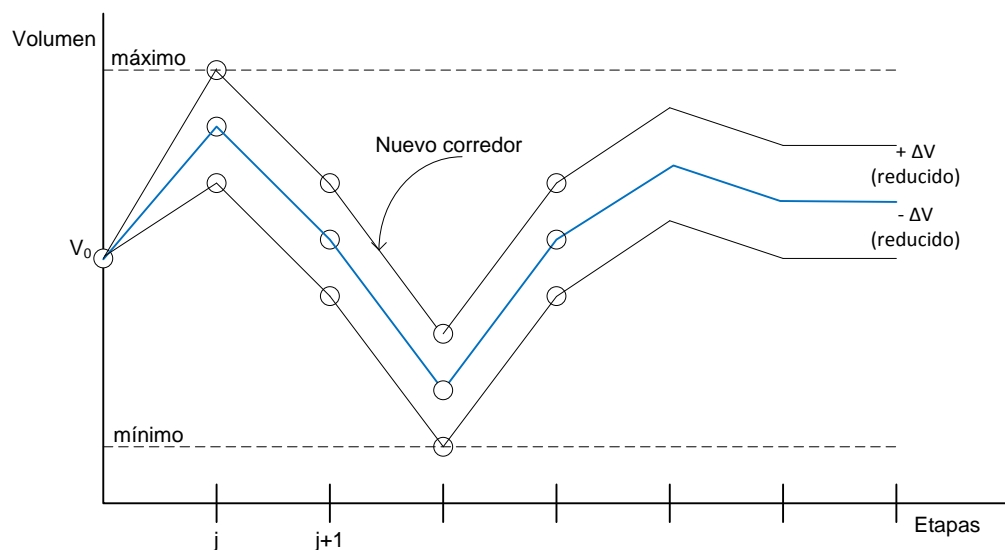


Figura 3. 22 Formación del nuevo corredor método programación dinámica incremental

Este procedimiento es repetido hasta que las trayectorias finales coincidan entre sí o cumplan el criterio de convergencia, criterio que consiste en verificar que no exista un valor significativo en la variación del valor de la función objetivo por cada iteración. Para asegurar que la solución sea óptima, se debe repetir este ejercicio de programación dinámica incremental comenzando con un ancho de corredor diferente o una trayectoria inicial diferente. Al final se comparan las soluciones y se escogerá la mejor.

Para el caso de dos variables de estado (por ejemplo volúmenes de dos embalses) la formulación de la trayectoria inicial se basa de manera similar como lo mencionado anteriormente para el caso de una sola variable, salvo que están se conjugan hasta formar un espacio bidimensional que de manera gráfica se puede apreciar en la figura 3.23.

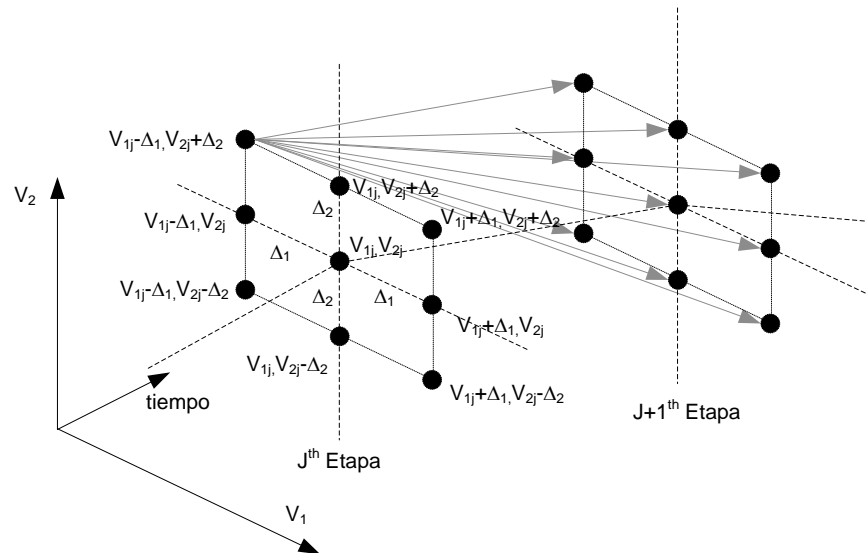


Figura 3. 23 Diagrama del método programación dinámica incremental para dos variables de estado

### 3.2.6 MÉTODO DE INTERCONEXIÓN DE LOS EMBALSES

En los recursos hídricos este proceso está dado por encontrar la optimización de la programación de un solo embalse cada vez mientras que el resto de los embalses permanecen fijos, cuando se termina con uno se sigue el procedimiento con el embalse situado aguas abajo del primero y así sucesivamente hasta que la solución converge. Esta técnica reduce el número de variables de estado, en vez de evaluar la función de retorno para todas las posibles combinaciones del vector de estado, se variara un solo componente al mismo tiempo es decir uno a la vez.

La principal ventaja de este método es de mantener una representación detallada de la cuenca del sistema [33], [44]. Por tal motivo en el desarrollo de esta tesis se utiliza esta técnica para poder integrar los embalses en cascada del complejo hidroeléctrico Paute. En la figura 3.24 se representa de manera general el diagrama de flujo básico del método indicado anteriormente para dos embalses.

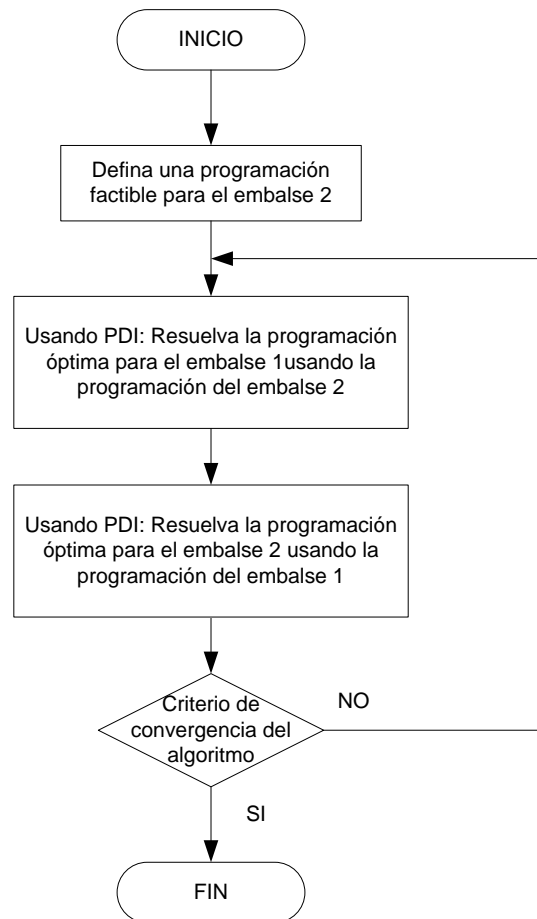


Figura 3. 24 Diagrama de flujo para el método de interconexión de los embalses

## **CAPITULO IV**

### **MODELO PARA LA PROGRAMACIÓN OPTIMA DE LAS CENTRALES DEL COMPLEJO PAUTE**

#### **4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Desde que la central Mazar inicio su etapa de operación en el 2010 en el complejo hidroeléctrico Paute el recurso hídrico de su cuenca se ha visto modificado, y debido que recae en las propias empresas buscar herramientas que apoyen en la búsqueda de decisiones acertadas en el periodo de planeación y al no existir dentro del complejo Paute una programación entre las dos centrales existentes del complejo, como son las centrales Mazar y Molino, se pretende con esta tesis modelar los dos embalses en cascada y determinar una planeación y uso eficiente del recurso hídrico de los embalses así como de sus centrales de generación en el largo plazo (un año), satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones propias del complejo. Logrando al final un mejoramiento en la producción hidroeléctrica y de la eficiencia de las dos centrales (Mazar y Molino).

Es pertinente indicar que se delimitó el alcance de este trabajo en el estudio del complejo hidroeléctrico Paute en el contexto de un sistema integrado de embalses dispuestos en serie de manera puntual, y no considera dentro de su análisis al sistema nacional interconectado en su conjunto, esta particularidad se debió al encontrar durante el planteamiento de esta tesis limitaciones de acceso a la información de todo el sistema, por lo que no fue pertinente plantear un modelo global que integre a todo el SNI.

#### **4.2 MODELO DEL COMPLEJO HIDROELECTRICO PAUTE.**

En la figura 4.25 se presenta la distribución física del complejo hidroeléctrico Paute con las dos centrales construidas actualmente, la central Mazar y la central Molino, estas se encuentran graficadas esquemáticamente y dispuestas en cascada, de igual manera se muestra el embalse de Mazar formado por la presa mazar y el embalse Amaluza formado por la presa Daniel Palacios.

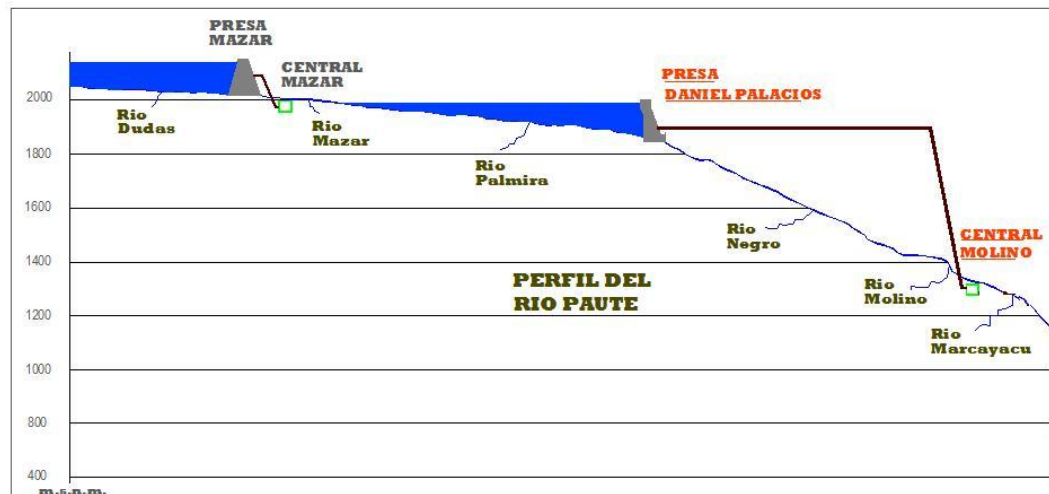


Figura 4. 25 Distribución física del complejo hidroeléctrico Paute integral<sup>18</sup>

De esta distribución de embalses y centrales en cascada se va a determinar un modelo hídrico como matemático para el análisis motivo de esta tesis.

Dentro del modelo hídrico en estudio se ha determinado el análisis para los dos embalses existentes con sus centrales asociadas, es decir el modelo se enfoca en los embalses de Mazar y Amaluza así como de las centrales de Mazar y Molino respectivamente.

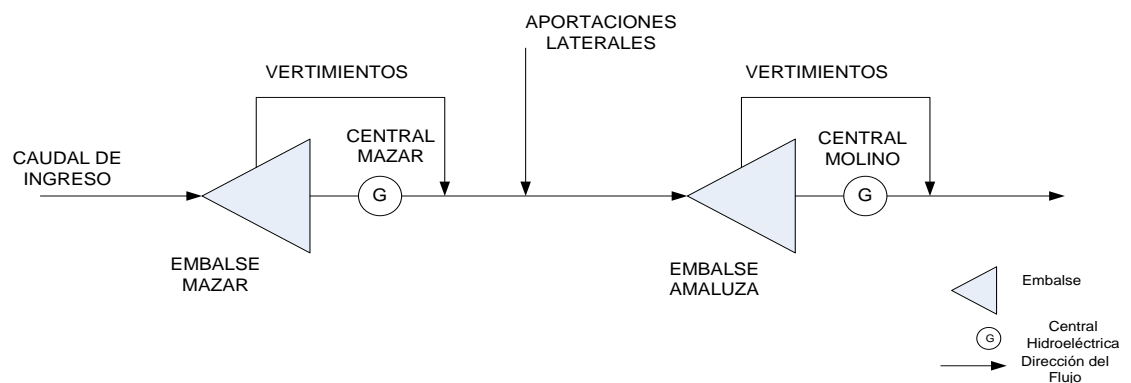


Figura 4. 26 Modelo del complejo hidroeléctrico Paute embalses de Mazar y Molino

En el modelo que se presenta en la figura 4.26 se observa el aprovechamiento de las aguas del río Paute como caudal de ingreso para el embalse Mazar formado por la presa Mazar, este embalse de cabecera de la cuenca cuenta con una capacidad de almacenamiento total de 410 hm<sup>3</sup> explicado anteriormente en el capítulo 2, de este reservorio la central Mazar toma el recurso hídrico para la

<sup>18</sup> Fuente: Modificado del mímico del complejo hidroeléctrico Paute del sistema XA-21 CCG/Hidropaute Central Molino

producción de energía eléctrica mediante dos generadores con una capacidad de 85 MW cada uno.

La central Mazar tiene una capacidad máxima de turbinamiento de  $141,1 \text{ m}^3/\text{s}$  este turbinamiento es descargado en la cuenca del río Paute aguas abajo de la presa Mazar.

Si las condiciones hidrológicas son favorables en la cuenca de Paute pueden existir vertimientos en el embalse de Mazar si sobrepasan el nivel máximo de almacenamiento del reservorio, límite que se encuentra en la cota 2153 m.s.n.m., este exceso de agua es evacuado por dos vertederos independientes libres con una capacidad de evacuación máxima de  $8\,550 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La presa Mazar posee un desagüe de fondo que se utiliza para evacuar el recurso hasta el embalse Amaluza en el caso de que los generadores se encuentren en mantenimiento, o exista algún tipo de restricción de turbinamiento, el caudal máximo que se puede evacuar por el mismo es de  $340 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Entre el embalse de Mazar y Amaluza existe pequeñas cuencas como ríos y quebradas que aportan a la cuenca del río Paute tales como el río Mazar, río Palmira, río Pulpito, Llavircay, etc. estos caudales dentro del modelo en estudio son considerados como *aportaciones laterales* para el mismo, por lo tanto el caudal de ingreso total para el embalse Amaluza es la suma de caudales de las aportaciones laterales, turbinamiento de la central Mazar y vertimientos del embalse Mazar respectivamente.

El embalse Amaluza formado por la presa Daniel Palacios tiene una capacidad de almacenamiento de  $120 \text{ hm}^3$  (capacidad inicial de diseño) actualmente esta capacidad por el tiempo de operación del embalse y por la sedimentación acumulada en el mismo se ha reducido su capacidad hasta  $69,8 \text{ hm}^3$ , de este embalse toma el agua la central Molino para producción de energía eléctrica mediante 10 generadores con una capacidad total instalada en la planta de 1100 MW y con una capacidad máxima de turbinamiento de  $205 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente.

De existir condiciones hidrológicas muy favorables en el embalse se tendrá que verter si el nivel del embalse sobrepasa la cota 1991 m.s.n.m. mediante compuertas radiales ubicadas en los seis vertederos con una capacidad máxima de vertimiento de  $7\,724 \text{ m}^3/\text{s}$  con la apertura de las seis compuertas.

Todo el recurso hídrico turbinado de la central Molino y vertido del embalse Amaluza es evacuado a la cuenca del río Paute para seguir su cauce natural,

cabe indicar que estas condiciones se presentan en la actualidad, después de la construcción de la central Sopladora y Cardenillo en un futuro, esto cambiaria considerablemente debido que las aguas turbinadas servirán de alimentación para la generación de energía.

### 4.3 FORMULACION MATEMATICA DE OPTIMIZACION

Un modelo matemático es siempre una representación aproximada de la realidad, este modelo debe ser capaz de definir parámetros que permitan evaluar cuantitativamente los méritos de diferentes alternativas de operación. Si por un lado, un modelo debe representar el mayor número posible de variables que reflejan la toma de decisiones, por otro lado debe ser suficientemente simple para que pueda ser implementado en algoritmos y permitir el análisis de una gran variedad de escenarios [51].

De la descripción detallada en el punto anterior sección 4.2, para el complejo hidroeléctrico Paute (central Mazar y central Molino) podemos entonces establecer las ecuaciones del modelo matemático considerando el período de análisis de un año.

#### 4.3.1 FUNCION OBJETIVO

La formulación matemática del planeamiento de la operación del complejo Paute debe representar el objetivo de maximizar la generación hidroeléctrica observando al mismo tiempo las restricciones asociadas a los límites operacionales de los embalses, las restricciones asociadas a la capacidad de producción de las centrales y el balance hídrico, a lo largo del período de estudio.

$$FO = \text{Max} \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^2 ET_{ij} \quad (4.1)$$

Los volúmenes almacenados del embalse, y los volúmenes turbinados son asumidos como variables de estado y variables de decisión respectivamente. Esta maximización está sujeta a restricciones en los volúmenes de los embalses así como los caudales turbinados por las centrales, por lo que en cualquier modelo estas restricciones [21], [33], [34], [45], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60] dependen de las características propias del problema en análisis.

### 4.3.2 RESTRICCIONES

El valor óptimo de la función objetivo es calculada sujeta a las restricciones hídricas, que para el complejo Paute son de dos tipos: restricciones de igualdad, restricciones de desigualdad respectivamente.

#### Balance hídrico (Ecuaciones de transformación de estado)

El comportamiento del almacenamiento o de la reserva de agua a lo largo del periodo de estudio obedece al Principio de Conservación del Agua [19] que dice:

*“El volumen de agua almacenado en el embalse al final de la etapa  $j$  (inicio de la etapa  $j+1$ ), es igual al volumen en el inicio de la etapa  $j$ , más el volumen de ingreso (afluente), menos el volumen de salida del embalse (turbinamientos y vertimientos), más los volúmenes de salida de los embalses aguas arriba”.*

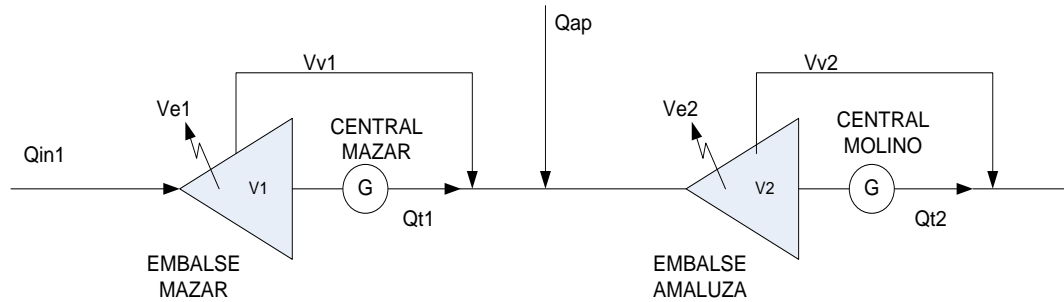


Figura 4. 27 Variables del Modelo del complejo hidroeléctrico Paute embalses de Mazar y Molino

Este principio es representado mediante la ecuación de balance hídrico, también llamado ecuación de balance de masas, ecuación de continuidad, etc. [19], [20], [45], [51], que para el complejo Paute es representado de la siguiente forma:

Para el embalse 1 río arriba (embalse Mazar).

$$V_{1,j+1} = V_{1,j} + Qin_{1,j} * f - Ve_{1,j} - Vv_{1,j} - Q_{T_{1,j}} * f; \quad j = 1, 2, \dots, T \quad (4.2)$$

Para el embalse 2 río abajo (embalse Amaluza), dados los aportes de vertimiento y turbinamiento del embalse Mazar río arriba se adicionan al caudal de aportaciones laterales de entrada al embalse.

$$V_{2,j+1} = V_{2,j} + Qap_{2,j} * f - Ve_{2,j} - Vv_{2,j} - Q_{T_{2,j}} * f + [Q_{T_{1,j}} * f + Vv_{1,j}] \quad j = 1, 2, \dots, T \quad (4.3)$$



Si se hace referencia a volúmenes finales de la etapa  $j$  (inicio de la etapa  $j+1$ ), para los embalses de Mazar y Amaluza, la expresión en la ecuación de continuidad se toman en cuenta los volúmenes por evaporaciones y filtraciones, aunque como no se cuenta con esta información en el complejo Paute estos datos se desprecian para los dos embalses, aunque cabe señalar que se encuentra implementado en el programa desarrollado de esta tesis (algoritmo) las entradas por si se contará con estos datos en el futuro.

### Generación de energía

La generación de energía es considerada como una función relacionada con el caudal de turbinamiento, el salto neto y la eficiencia del grupo turbina-generator

$$ET_{i,j} = 9,81 \times \eta \times Q_{T_{i,j}} \times H_{n_{i,j}} \times t_{i,j} / 10^6 \text{ [MWh]} \quad (4.4)$$

### Altura neta

La altura neta está dada por la diferencia entre la altura o cota del nivel del embalse menos la altura del nivel de la descarga menos la altura por pérdidas de conducción. Por lo tanto el salto neto es considerado como una función del nivel de agua en el reservorio, dependiendo respectivamente del almacenamiento de agua en el embalse.

$$H_{n_{i,j}} = El_{i,j} - Ed_{tur_{i,j}} - H_{per_{i,j}} \text{ [m]} \quad (4.5)$$

Para centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton (Molino) el nivel de la descarga está dado por la elevación del eje de la turbina. Y para centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Francis (Mazar) el nivel de la descarga está dado por la elevación física de sumergencia (nivel de agua que sumerge la turbina), debido que las turbinas se encuentran embebidas en agua.

### Almacenamiento

El almacenamiento de agua en los embalses de Mazar y Amaluza durante los diferentes periodos debe encontrarse entre los límites de capacidad de los mismos, el volumen máximo está dado por la capacidad de almacenamiento de los embalses, y el volumen mínimo, determinado por el nivel mínimo operativo de las centrales; cabe señalar debido al tiempo de construcción en Amaluza se realizan periódicamente batimetrías que miden el nivel de sedimentación presente en el embalse y establecen la cota mínima para la operación de la

central Molino, esta particularidad se ha previsto en el programa y es un dato que puede ser actualizado cuando sea necesario.

$$Vmin_{i,j} \leq V_{i,j} \leq Vmax_{i,j} \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.6)$$

### Turbinamiento

Esta restricción está dada por los límites máximo y mínimo de turbinamiento que pueden dar las unidades de la central hidroeléctrica acoplada al embalse, estos caudales turbinados representan los límites de generación en las plantas hidroeléctricas, dependiendo eso sí, de la disponibilidad de todos los grupos generadores (indisponibilidad por mantenimientos) y del rendimiento del tipo de la turbina.

$$Q_{Tmin_{i,j}} \leq Q_{T_{i,j}} \leq Q_{Tmax_{i,j}} \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.7)$$

### Vertimiento

Esta restricción está dada por el vertimiento que puede ocurrir cuando el almacenamiento de agua en el embalse excede el límite máximo de almacenamiento del embalse; para este estudio se considera el vertimiento:

Para ambos embalses:

$$Vv_{i,j} \geq 0 \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.8)$$

### Expresiones Auxiliares

$$\eta = \eta_G * \eta_T \quad (4.9)$$

$$Q_{T_{i,j}} = Q_{Tmax_{i,j}} \quad \text{cuando } Q_{T_{i,j}} \geq Q_{Tmax_{i,j}} \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.10)$$

$$Vv_{i,j} = 0 \quad \text{cuando } \begin{cases} V_{i,j+1} \leq Vmax_{i,j+1} \\ Q_{T_{i,j}} \leq Q_{Tmax_{i,j}} \end{cases} \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.11)$$

$$Vv_{i,j} = (Q_{T_{i,j}} - Q_{Tmax_{i,j}}) * f \quad \text{si } \begin{cases} V_{i,j} \geq Vmax_{i,j} \\ Q_{T_{i,j}} \geq Q_{Tmax_{i,j}} \end{cases} \quad i = 1,2; \quad j = 1,2, \dots, T \quad (4.12)$$

**Nomenclatura:**

$ET_{i,j}$	Energía total producida por la central $i$ en el periodo $j$ [MWh]
$H_{n,i,j}$	Altura neta de la caída en relación al embalse $i$ en el periodo $j$ [m]
$El_{i,j}$	Nivel del embalse $i$ durante el periodo $j$ [m]
$Edtur_{i,j}$	Nivel de la descarga de la central $i$ durante el periodo $j$ [m]
$H_{per,i,j}$	Altura de pérdidas por conducción de la central $i$ durante el periodo $j$ [m]
$T$	Número de periodos (12 meses)
$\eta$	Eficiencia de la central
$\eta_G$	Eficiencia del generador
$\eta_T$	Eficiencia de la turbina
$t_{i,j}$	Tiempo en el periodo $j$ [h]
$V_{i,j}$	Volumen del embalse $i$ al inicio del periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$V_{i,j+1}$	Volumen del embalse $i$ al finalizar el periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$V_{min,i,j}$	Volumen mínimo del embalse $i$ al inicio del periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$V_{max,i,j}$	Volumen máximo del embalse $i$ al inicio del periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$Q_{T,i,j}$	Caudal de turbinamiento del embalse $i$ durante el periodo $j$ [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{Tmin,i,j}$	Caudal turbinado mínimo del embalse $i$ durante el periodo $j$ [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{Tmax,i,j}$	Caudal turbinado máximo del embalse $i$ durante el periodo $j$ [m <sup>3</sup> /s]
$Ve_{i,j}$	Volumen de pérdidas por evaporación y filtraciones del embalse $i$ durante el periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$Vv_{i,j}$	Volumen de vertimientos del embalse $i$ durante el periodo $j$ [hm <sup>3</sup> ]
$Q_{in,1,j}$	Caudal de ingreso al embalse 1 durante el periodo $j$ [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{ap,2,j}$	Caudal de ingreso de las aportaciones laterales al embalse 2 durante el periodo $j$ [m <sup>3</sup> /s]
$f$	Tiempo de duración del intervalo

Otras variables han sido ya definidas anteriormente.

En la programación dinámica, la ecuación recursiva es usada para determinar la solución óptima determinística dentro de cada corredor, esta ecuación tiene la siguiente expresión:

$$FO_j^*(V_j) = \underset{Q_{T,i,j}}{Max} \left[ ET_{i,j} \left( V_{i,j}, Q_{T,i,j} \right) + FO_{j+1}^*(V_{j+1}) \right] \quad (5.1)$$

Donde  $FO_j^*(V_j)$  es el máximo valor total de la función objetivo de la etapa 1 hasta la etapa  $j+1$ , cuando el estado de la etapa  $j$  es  $V_j$ . Donde la producción máxima de energía en la etapa  $j$  está asociada con un estado particular  $V_j$ , dado una generación de energía subóptima en una etapa futura  $FO_{j+1}^*(V_{j+1})$ . La decisión  $Q_{T_{i,j}}$  identificada en el curso de la maximización transforma el sistema de un estado  $V_j$  en estado  $V_{j+1}$ .

Para la evaluación de la función objetivo en este proceso de optimización se utiliza Programación Dinámica Incremental (capítulo 3 sección 3.2.5) y el método de Interconexión de los embalses (capítulo 3 sección 3.2.6) se utiliza para integrar los mismos debido a la configuración de las centrales y embalses en cascada del complejo Paute, por lo que, para la solución del problema es necesario que la variable de estado (volumen) tenga inicialmente una ruta factible (trayectoria inicial de prueba) para iniciar el proceso de optimización con Programación Dinámica Incremental esto se indica en la sección 3.2.5 del capítulo 3.

# CAPITULO V

## IMPLEMENTACION DEL MODELO UTILIZANDO PROGRAMACION DINAMICA

### 5.1 IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL UTILIZANDO PROGRAMACION DINAMICA DETERMINISTICA

El algoritmo fue implementado en el fichero de texto M-Files \*.m de la plataforma MATLAB® (R2008a) versión 7.6 estudiantil<sup>19</sup>. El nombre del archivo de la interfaz gráfica (GUI) creado para la implementación del modelo del complejo Paute es llamado “**prodipa**”. Por las ventajas que presenta MATLAB® para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices con un lenguaje de programación de código básico se opta por utilizar esta herramienta computacional para la implementación del algoritmo del modelo del complejo hidroeléctrico Paute.

#### 5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL “PRODIPA”

Prodipa posee una interfaz gráfica principal y en esta se muestra el esquema de la disposición física completa del complejo hidroeléctrico Paute tal como se presenta en la figura 5.28.

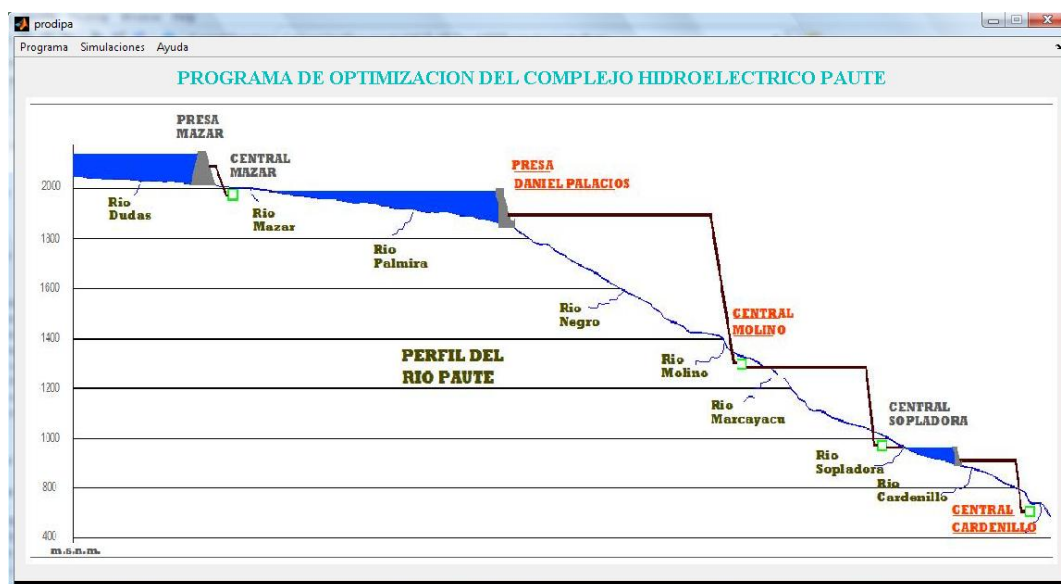


Figura 5. 28 Interfaz principal del programa computacional desarrollado

<sup>19</sup> MATLAB® es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory” marca registrada *The Mathworks*; es un programa de cálculo técnico y científico que principalmente sirve para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices [61].

Para el estudio del modelo del complejo Paute en “prodipa” se puede seleccionar diferentes tipos de simulaciones, estas simulaciones se basan de acuerdo a la información de entrada de los caudales de ingreso; esta selección puede ser un periodo histórico de los caudales de ingreso, selección de caudales generados [13] o ingreso manual de caudales. Para el caso del periodo histórico, la elección del periodo de análisis puede ser dentro de los 47 años de registro de caudales históricos. Para el caso de la selección de caudales generados se utiliza los caudales que han sido proporcionados por el área de hidrología de la unidad de negocio Hidropaute (hasta 500 series sintéticas). Para la opción de ingreso manual de los caudales queda a consideración del analista ingresar esta información.

En la figura 5.29 se muestra la presentación de la interfaz “proghistorico” para el análisis del modelo con caudales históricos.

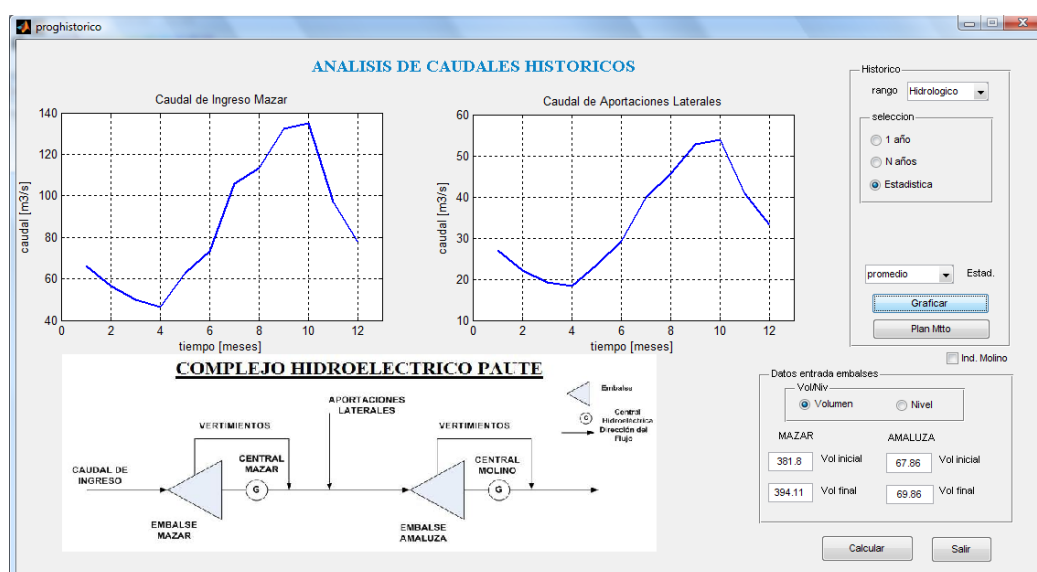


Figura 5. 29 Interfaz para el análisis con caudales históricos del complejo Paute

En la figura 5.30 se presenta la interfaz “caudalgen” para la selección de caudales generados con esta información se realiza el análisis del complejo con series de caudales generadas dentro de la interfaz “progenerados”

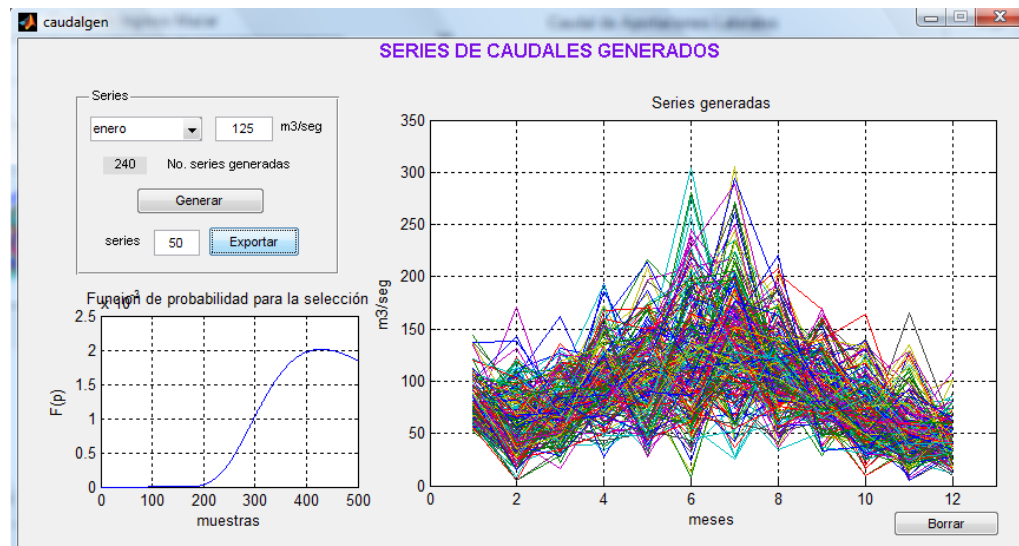


Figura 5. 30 Interfaz para la selección de caudales generados

Como se indicó anteriormente el programa presenta la posibilidad de ingresos manuales, es por eso que en la figura 5.31 se presenta la interfaz “caudal manual” para el ingreso manual de la información de caudales de ingreso para el embalse Mazar así como de los caudales laterales para el embalse Amaluza, adicionalmente en esta interfaz se tiene la opción de realizar la variación de las trayectorias iniciales de prueba de los embalses. La interfaz general para resolver el problema con ingresos manuales se denota “progmanual” dentro del programa computacional “prodipa”.

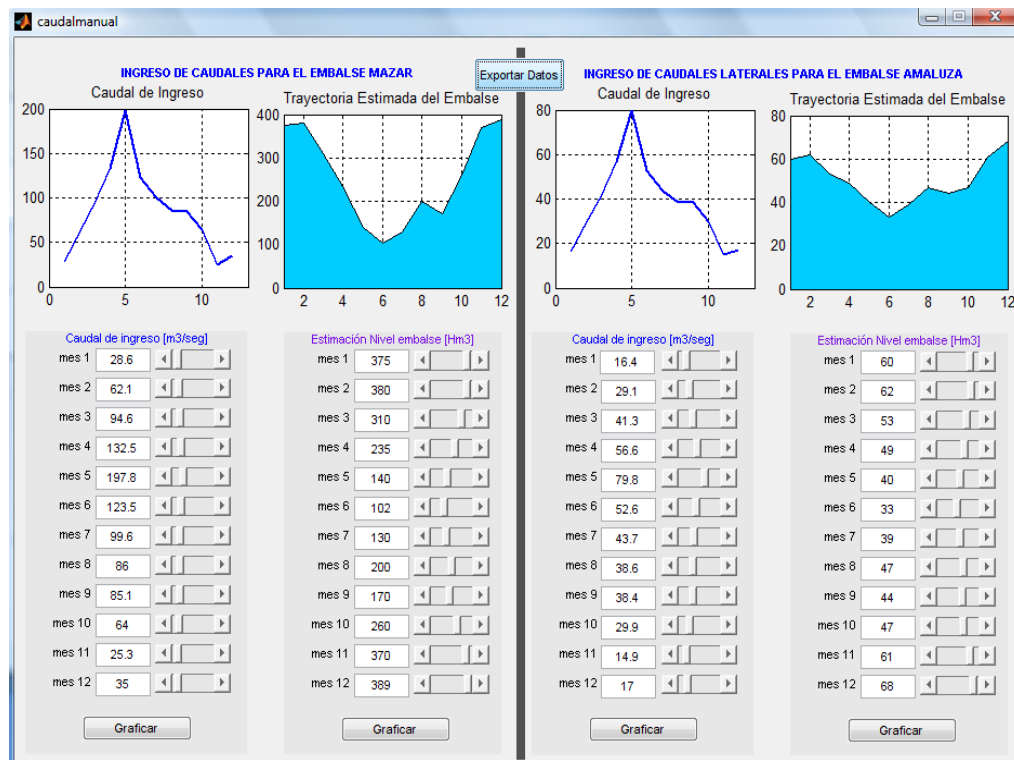
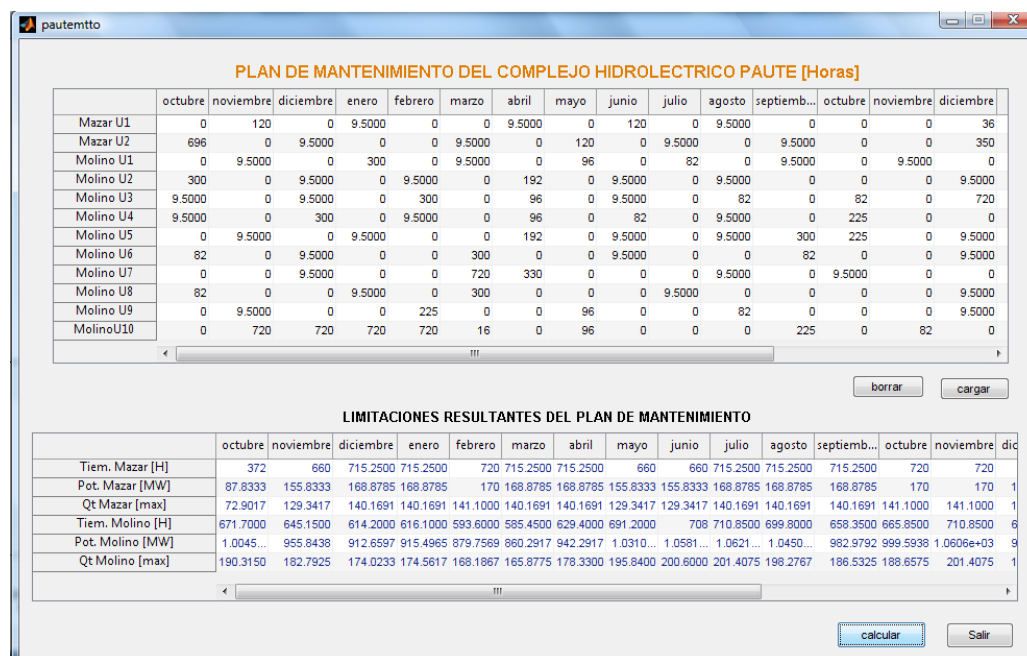


Figura 5. 31 Interfaz para el ingreso manual de caudales y trayectoria inicial de los embalses de Mazar y Molino

Dentro del algoritmo desarrollado se ha considerado las limitaciones por mantenimiento de las unidades de generación, estas limitaciones son calculadas de acuerdo al plan anual de mantenimiento, mismo que es presentado al CENACE para que sean considerados dentro del Programa Anual de Mantenimientos del SNI [29], este plan de mantenimiento es elaborado por el área de mantenimiento de la unidad de negocio Hidropaute.

Este plan anual esta dado para cada una de las unidades de generación de las dos centrales del complejo Paute; este plan es ingresado en la interfaz gráfica “Pautemtto” creada para este fin, en esta interfaz se ingresa para cada etapa el número de horas a utilizar para mantenimiento de las unidades, la interfaz se muestra en la figura 5.32.



**PLAN DE MANTENIMIENTO DEL COMPLEJO HIDROELECTRICO PAUTE [Horas]**

	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiemb...	octubre	noviembre	diciembre
Mazar U1	0	120	0	9.5000	0	0	9.5000	0	120	0	9.5000	0	0	0	36
Mazar U2	696	0	9.5000	0	0	9.5000	0	120	0	9.5000	0	9.5000	0	0	350
Molino U1	0	9.5000	0	300	0	9.5000	0	96	0	82	0	9.5000	0	9.5000	0
Molino U2	300	0	9.5000	0	9.5000	0	192	0	9.5000	0	9.5000	0	0	0	9.5000
Molino U3	9.5000	0	9.5000	0	300	0	96	0	9.5000	0	82	0	82	0	720
Molino U4	9.5000	0	300	0	9.5000	0	96	0	82	0	9.5000	0	225	0	0
Molino U5	0	9.5000	0	9.5000	0	0	192	0	9.5000	0	9.5000	300	225	0	9.5000
Molino U6	82	0	9.5000	0	0	300	0	0	9.5000	0	0	82	0	0	9.5000
Molino U7	0	0	9.5000	0	0	720	330	0	0	0	9.5000	0	9.5000	0	0
Molino U8	82	0	0	9.5000	0	300	0	0	0	9.5000	0	0	0	0	9.5000
Molino U9	0	9.5000	0	0	225	0	0	96	0	0	82	0	0	0	9.5000
Molino U10	0	720	720	720	720	16	0	96	0	0	0	225	0	82	0

**LIMITACIONES RESULTANTES DEL PLAN DE MANTENIMIENTO**

	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiemb...	octubre	noviembre	diciembre
Tiem. Mazar [H]	372	660	715.2500	715.2500	720	715.2500	715.2500	660	660	715.2500	715.2500	715.2500	720	720	
Pot. Mazar [MW]	87.8333	155.8333	168.8785	168.8785	170	168.8785	168.8785	155.8333	155.8333	168.8785	168.8785	168.8785	170	170	1
Qt Mazar [max]	72.9017	129.3417	140.1691	140.1691	141.1000	140.1691	140.1691	129.3417	129.3417	140.1691	140.1691	140.1691	141.1000	141.1000	1
Tiem. Molino [H]	671.7000	645.1500	614.2000	616.1000	593.6000	585.4500	629.4000	691.2000	708	710.8500	699.8000	658.3500	665.8500	710.8500	6
Pot. Molino [MW]	1.0045...	955.8438	912.6597	915.4965	879.7569	860.2917	942.2917	1.0310...	1.0581...	1.0621...	1.0450...	982.9792	999.5938	1.0606e+03	9
Qt Molino [max]	190.3150	182.7925	174.0233	174.5617	168.1867	165.8775	178.3300	195.8400	200.6000	201.4075	198.2767	186.5325	188.6575	201.4075	1

Figura 5. 32 Interfaz para el ingreso en horas del Plan de mantenimiento de las unidades de generación de la centrales Mazar y Molino

## 5.1.2 DESCRIPCION DEL ALGORITMO

El programa computacional “**prodipa**” está desarrollado para un periodo de 12 etapas (meses) tal como se indicó en la formulación del modelo en secciones anteriores. Para realizar la optimización del problema de maximización de la energía del complejo hidroeléctrico Paute es necesario facilitar al programa de la información inicial (entradas) para que pueda ejecutar su algoritmo, ciertas entradas se encuentran predefinidas en archivos \*.m y otras directamente son ingresadas en la interfaz por el usuario debido a la facilidad de cambio, dichas entradas en esencia son:



- ✓ Inicio del periodo de análisis
- ✓ Características del embalse de Mazar y Amaluza
- ✓ Características de la central Mazar y Molino
- ✓ Restricciones por mantenimiento de las unidades.
- ✓ Valor inicial del volumen o cota del nivel del embalse de Mazar y Amaluza
- ✓ Valor final del volumen o cota del nivel del embalse de Mazar y Amaluza
- ✓ Caudales de ingreso del periodo en análisis
- ✓ Caudales laterales del periodo en estudio

Como se explicó anteriormente en el capítulo 3 la Programación Dinámica no posee una formulación específica que represente a cada problema, si no cada problema debe ser adecuado de acuerdo a sus características, por tal razón a continuación se establecen los principales términos a utilizarse en dicha implementación.

**Etapas ( $t$ ).**- En la optimización del complejo hidroeléctrico Paute a largo plazo (un año) corresponde al mes.

**Variable de Estado ( $V$ ).**- Corresponde a los volúmenes de los embalses de Mazar y Amaluza respectivamente.

**Función de Retorno ( $E_T$ ).**- Valor de energía subóptima por etapa

**Variable de Decisión ( $Q_T$ ).**- Corresponde al caudal total turbinado

En la formulación de la programación dinámica determinística de este problema de optimización existen 12 etapas o periodos de un mes cada uno, con un vector de estado  $V_j$  teniendo dos valores  $V_{ij}$  y un vector de decisión  $Q_{T_j}$  teniendo dos valores  $Q_{T_{ij}}$ , brindando un vector de optimización con dos valores  $ET_{i,j}$ .

En la figura 5.33 se presenta un bosquejo del diagrama de flujo básico que se usa para el desarrollo computacional del modelo del complejo Paute, en donde el método de interconexión de los embalses se utiliza para integrar los dos embalses, y dentro del proceso de optimización para buscar la programación óptima de cada embalse se usa el método de programación dinámica incremental.

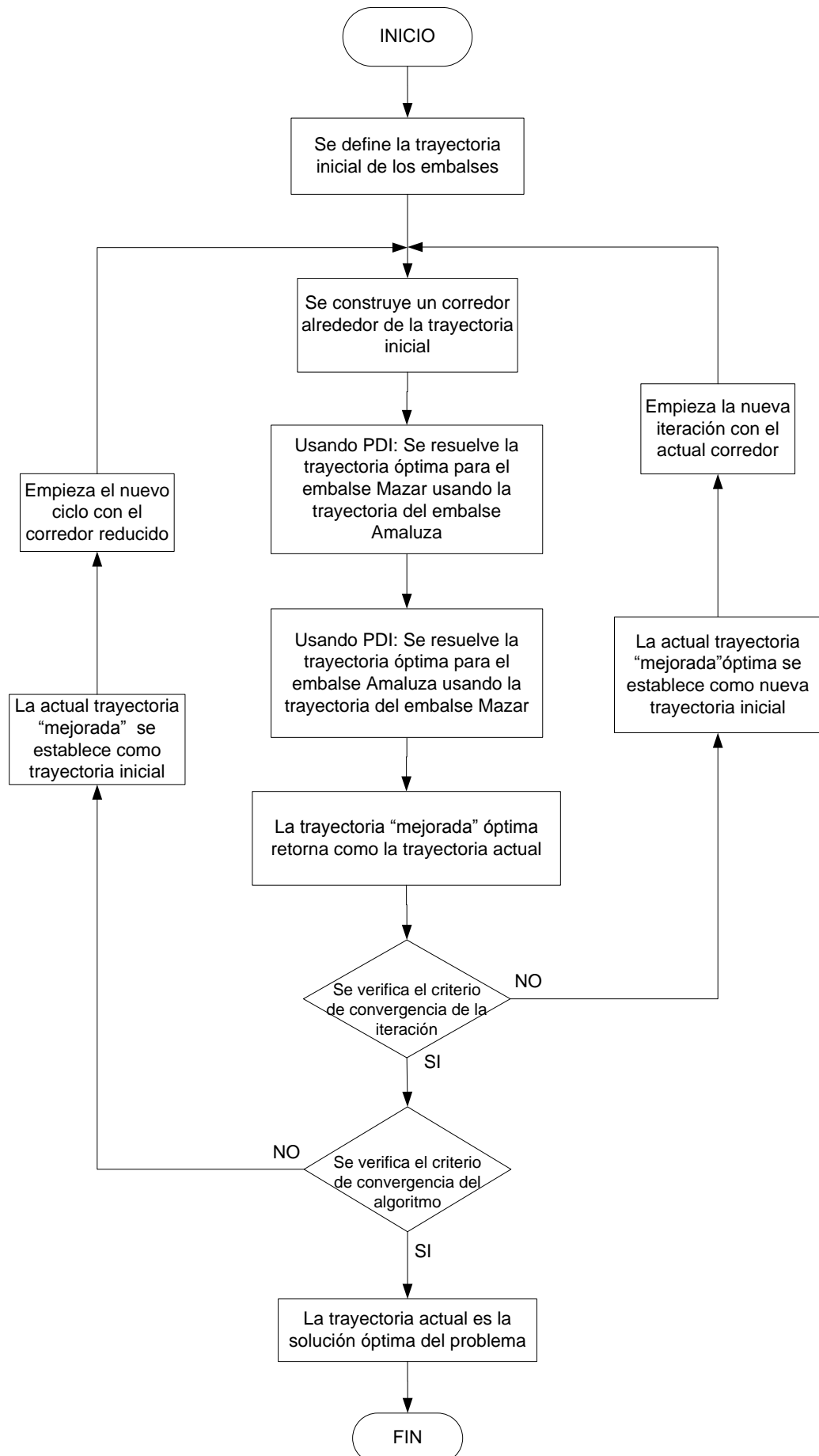


Figura 5. 33 Bosquejo del diagrama de flujo de la programación computacional del modelo del complejo hidroeléctrico Paute.

Dentro del proceso de la programación Dinámica Incremental [45], [64], [65] para el modelo del complejo hidroeléctrico Paute este inicia con la definición de las trayectorias iniciales de prueba (estimación de las variables de estado) respecto a los volúmenes de los embalses de Mazar y Amaluza a lo largo del periodo de estudio. Para esta tesis se estableció las trayectorias iniciales de prueba generales para los embalses de Mazar y Amaluza de acuerdo a las trayectorias presentadas en el Anexo J.

Posteriormente dentro del proceso de la Programación Dinámica Incremental en base a las trayectorias iniciales de prueba se procede a realizar dentro del algoritmo “el corredor” este se construye alrededor de las trayectorias de prueba con un intervalo discreto  $\Delta v$  lo suficientemente grande para cubrir un rango considerable de posibles volúmenes de almacenamiento. Para establecer el valor de  $\Delta v$  adecuado para las trayectorias de los embalses de Mazar y Amaluza se realizó un análisis del efecto que causa este parámetro, que de manera general da como resultado una variación en el número de iteraciones en la convergencia del algoritmo.

Continuando con la explicación del algoritmo, ahora para cada etapa (mes) existen tres valores discretos para cada componente del vector de estado  $j$  (volumen de los embalses), por lo tanto este problema se soluciona de acuerdo a la programación Dinámica convencional pero restringiendo a las variables de estado entre los límites del corredor es decir 3 valores discretos por etapa, logrando una búsqueda dentro de este corredor una trayectoria “mejorada” [45]. Esta trayectoria mejorada tiene relación directa con la producción de energía óptima. En el Anexo K se presenta a manera de ejemplo una tabla resumen de la producción de energía resuelta con Programación Dinámica Incremental para un solo embalse; ejemplo que sirve para mostrar el proceso de optimización de la producción de energía, así también se da a conocer la interrelación que tiene la producción de energía con los volúmenes del embalse dentro del cálculo.

En este algoritmo la resolución de la programación dinámica incremental se realiza utilizando el movimiento hacia atrás (backward) [39],[40] es decir desde la etapa 12 hasta la etapa 1, y si la solución óptima (trayectoria mejorada) del periodo cumple con el criterio de convergencia de la iteración se puede definir un nuevo corredor alrededor de ella con un valor de  $\Delta v$  más pequeño que para el algoritmo está definido  $\Delta v/1,5$ , caso contrario con esta solución mejorada “óptima” se definiría un nuevo corredor alrededor de esta solución sin variar el valor de  $\Delta v$  de la iteración anterior.

Todo este proceso es repetido iterativamente hasta cumplir el criterio de convergencia de la iteración el mismo está dado por

$$\delta_i = \frac{|F_i^* - F_{i-1}^*|}{|F_1^* - F_0^*|} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (5.1)$$

$F_i^*$  Valor óptimo de la trayectoria de la  $i$ th iteración dado el ciclo ( $i = 0, 1, 2, \dots$ )

$I$  Máximo número de iteraciones por ciclo

Si durante los ciclos intermedios el valor  $\delta_i$  dentro del proceso iterativo no presenta una significativa mejora en las próximas iteraciones el ciclo computacional termina con el siguiente criterio

$$\delta_i \leq \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (5.2)$$

$\varepsilon$  Criterio de convergencia con valor 0,001

El próximo ciclo empieza con un valor de intervalo  $\Delta v$  reducido en este caso  $\Delta v/1,5$  como se mencionó anteriormente, considerando la nueva trayectoria “mejorada” óptima del ciclo que se ha completado.

Para la evaluación de la función objetivo debido a la configuración de los embalses y centrales del complejo Paute en este proceso de optimización se utiliza después de la última iteración de cada ciclo el test de convergencia del algoritmo para determinar la solución óptima del problema y el mismo esta expresado como:

$$\lambda \geq \frac{|F_j^* - F_{j-1}^*|}{F_{j-1}^*} \quad (5.3)$$

$F_j^*$  Valor óptimo de la trayectoria del  $j$ th ciclo ( $j = 1, 2, 3, \dots$ )

$\lambda$  Criterio de convergencia con valor 0,0001 que finaliza el procedimiento de la programación cuando satisface dicho criterio

De manera general el criterio de convergencia del algoritmo consiste en verificar que no exista un valor significativo en la variación del valor de la función objetivo del problema por cada ciclo.

## 5.2 PRUEBA DEL MODELO

El argumento de validación del modelo en sí, es un tema complejo de resolver, y en el transcurso de esta investigación se manejaron distintas ideas de resolución sobre el tema, una de ellas validar el modelo con un caso de estudio propuesto por la literatura, pero es pertinente señalar que en la literatura consultada los casos estudiados en su mayoría no tiene una disposición de centrales que se asemeje al complejo en estudio (embalses en serie), más bien, presentan en algunos casos una configuración combinada de embalses entre serie y paralelo, así también los objetivos de algunos documentos analizan varios o distintos componentes que no están al alcance de esta investigación, lo que dificultó realizar una estimación de la validación buscada con dichos casos de estudio. Pero la principal dificultad fue encontrar un caso de estudio con toda la información disponible y necesaria para poder realizar un análisis de validación de la herramienta.

Bajo este antecedente y durante el transcurso del desarrollo de esta tesis se realizaron varios ensayos y análisis al algoritmo en diferentes escenarios y con diferentes entradas para comprender su funcionalidad, y a manera de ejemplo se realiza en esta sección una aplicación al algoritmo con caudales históricos, es decir se analiza un escenario pasado para mostrar la funcionalidad del programa desarrollado, para este fin se ha tomado los caudales, tiempos de mantenimiento del año hidrológico desde octubre de 1999 hasta septiembre del año 2000 como datos de entrada. Con los resultados que brinda “prodipa” se realiza un análisis comparativo con los registros estadísticos de la central Molino para identificar que el algoritmo está entregando información valedera.

### 5.2.1 SIMULACION DE LA CENTRAL MOLINO SIN CONSIDERAR LA CENTRAL MAZAR AÑO 1999-2000

Dentro de la interfaz de “prodipa” existe la opción para realizar análisis históricos con la consideración de que solo la central Molino estuviera operativa, es decir con la selección de esta opción el algoritmo solo se enmarca en el modelo de un solo embalse (Amaluza) con su central de generación (Molino) particularidad para análisis estadísticos.

Con este antecedente se presenta en el Anexo L los datos de entrada (año 1999-2000) para la ejecución del ejercicio y los resultados en detalle brindados por “prodipa” de la simulación realizada.

A continuación se muestra gráficamente el resultado óptimo brindado por “prodipa” de la producción de energía de la central Molino y de la trayectoria

óptima del embalse Amaluza relacionados con dicha producción, de igual manera el caudal turbinado y volúmenes vertidos son indicados.

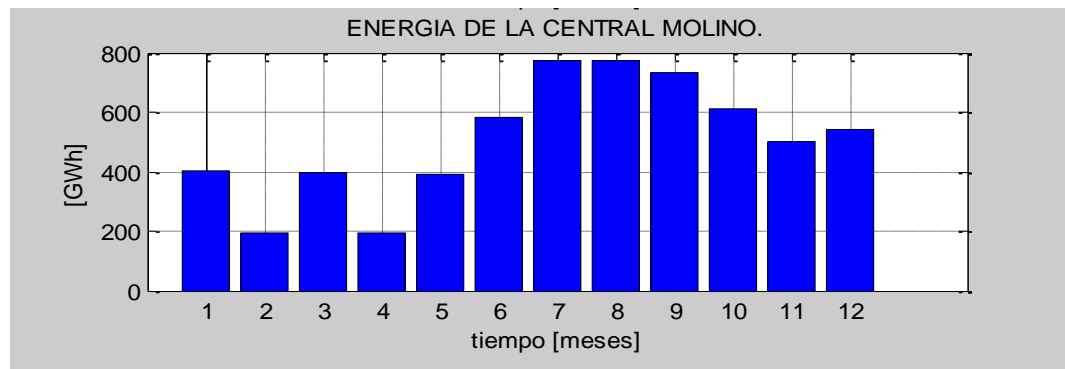


Figura 5. 34 Energía de la central molino

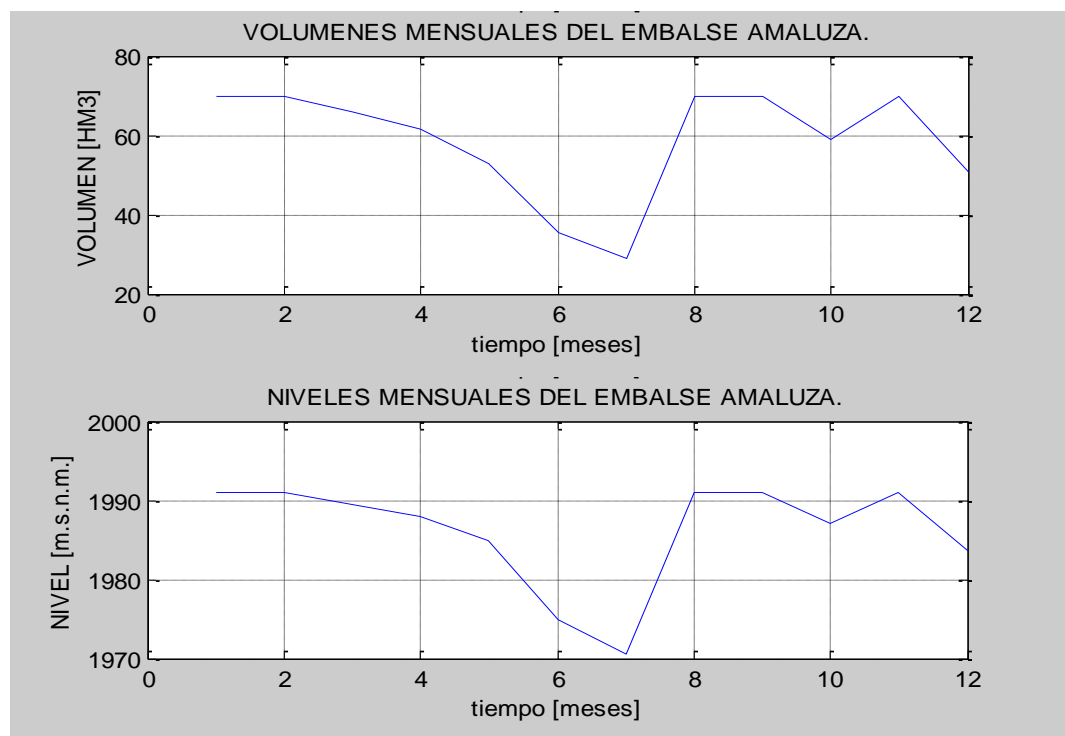


Figura 5. 35 Volúmenes y Niveles mensuales del Embalse Amaluza

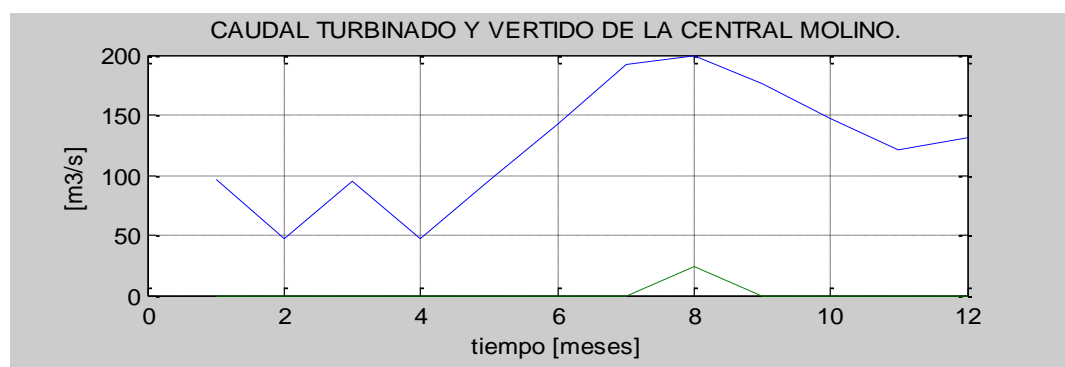


Figura 5. 36 Caudal turbinado de la central y caudal de vertimiento del embalse

## 5.2.2 SIMULACION DE LA CENTRAL MOLINO CONSIDERANDO LA CENTRAL MAZAR AÑO 1999-2000

Con el fin de tener otro punto de estudio dentro del análisis comparativo que se realiza posteriormente, se decide realizar una simulación del año hidrológico 1999-2000 con la consideración hipotética de que el embalse y la central Mazar estuvieran en funcionamiento.

Con esta antecedente en el programa “prodipa” y dentro de la interfaz para análisis histórico “proghistorico” se ejecuta el algoritmo que está desarrollado de acuerdo al modelo establecido en el capítulo 4, es decir con los dos embalses en cascada con sus respectivas centrales de generación. La información de entrada para la ejecución de esta simulación se presenta en el Anexo M, así como los resultados en detalle brindados por “prodipa”.

Los resultados óptimos de la simulación se muestran en las figuras 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 a continuación se presentan las figuras indicadas

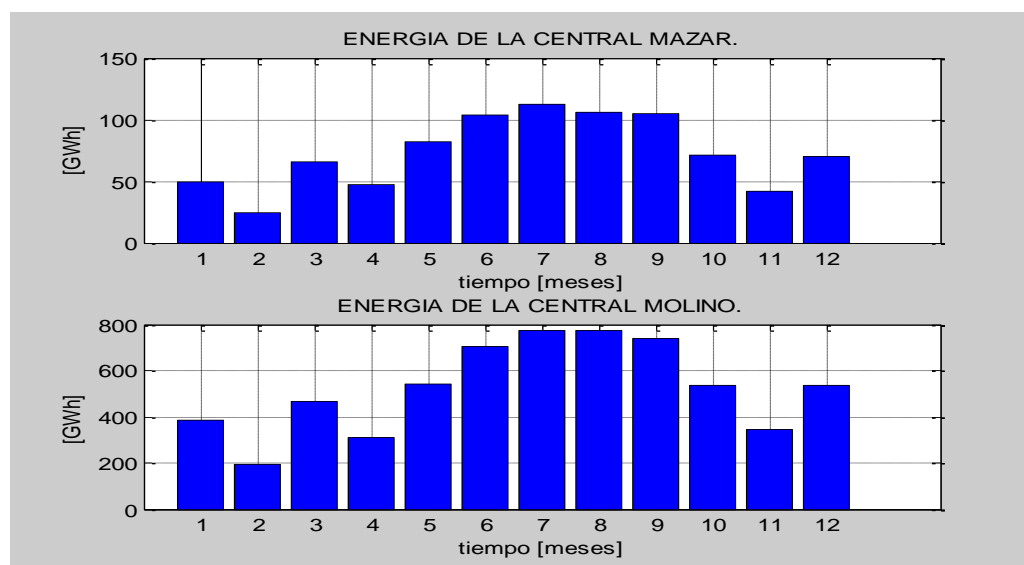


Figura 5. 37 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino

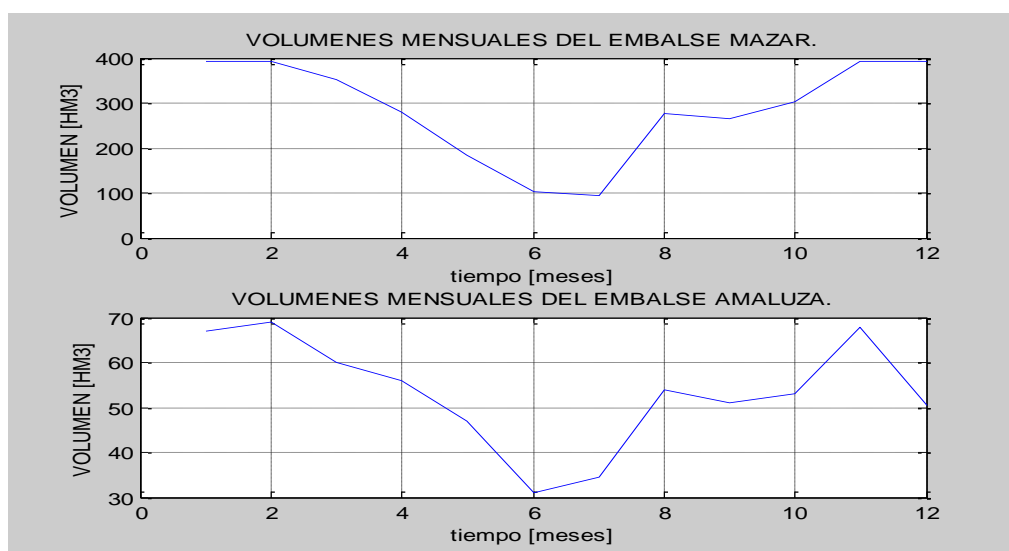


Figura 5. 38 Volúmenes mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza

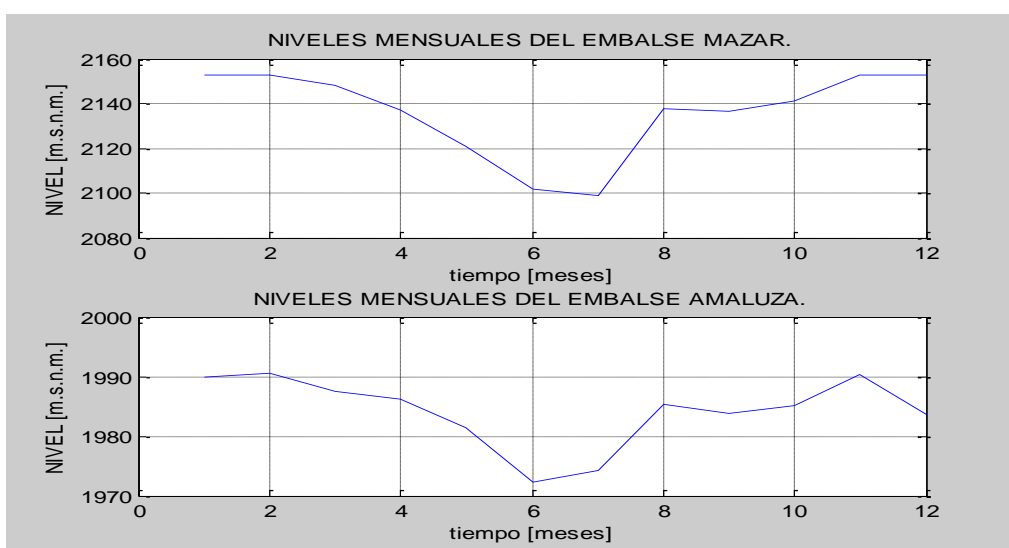


Figura 5. 39 Niveles mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza

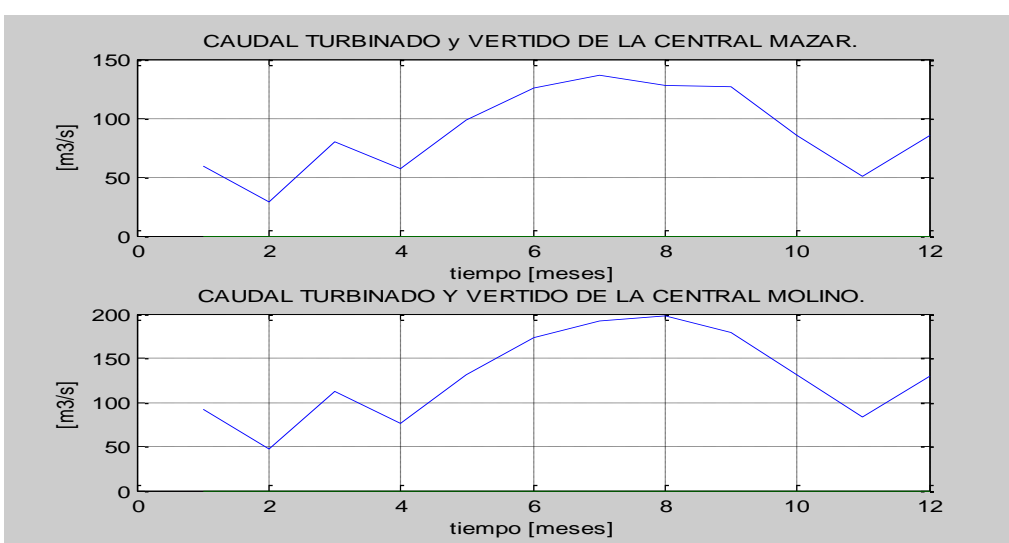


Figura 5. 40 Caudales turbinados y caudales de vertimiento mensuales de los Embalses de Mazar y Amaluza



### 5.2.3 ANALISIS COMPARATIVO

Para establecer si el algoritmo desarrollado ofrece resultados valederos, en este punto se realiza el análisis comparativo entre la estadística del año hidrológico desde octubre de 1999 - septiembre del año 2000 y los resultados que brindó “prodipa” de las simulaciones realizadas anteriormente, simulaciones que tomaron dos consideraciones: operación aislada de la central Molino y operación en conjunto de la central Mazar con la central Molino en ese periodo hidrológico.

A continuación se presenta en la tabla 5.6 un resumen de las variables analizadas con sus valores mensuales respectivos, valores que son tomados de la estadística de la central Molino y de los resultados brindados por “prodipa”, datos que sirven para realizar el análisis comparativo; los valores mostrados de la estadística han sido tomados de los informes anuales de 1999 y 2000 respectivamente emitidos por Hidropaute [67], [68].

Tabla 5. 6 Comparación de resultados de la estadística de Molino versus “prodipa”

MESES	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
Nivel Amaluza historico	1991.0	1984.7	1981.3	1980.7	1978.8	1990.8	1976.8	1990.9	1991.1	1991.1	1980.6	1983.5
Nivel Amaluza prodipa	1991	1991	1989.4	1988	1984.9	1974.9	1970.6	1991	1991	1987	1991	1983.5
Nivel Amaluza prodipa con Mazar	1989.8	1990.6	1987.4	1986.1	1981.4	1972.2	1974.3	1985.4	1983.8	1985	1990.2	1983.5
Energía Molino historico[GWh]	410.447	204.669	398.327	198.784	292.157	558.625	517.644	535.315	529.696	515.534	466.276	450.845
Energía Molino prodipa [GWh]	400.6	196.9	395.7	193.1	391.3	582.8	774	774	732	611.9	498.9	542.3
Energía Molino prodipa con Mazar [GWh]	385.2	193.5	467.9	312.1	540.4	701.7	773.8	774	738.5	539.1	346.9	538.9
Caudal Turbinado Amaluza historico[m3/s]	98.5	49.1	95.9	49.0	66.5	134.4	126.1	130.1	129.4	123.7	111.7	108.0
Caudal Turbinado Amaluza prodipa[m3/s]	96.3	47.3	95.2	46.5	94.7	142.6	191.6	199	176.1	147.6	120.3	131
Caudal Turbinado Amaluza prodipa con Mazar[m3/s]	92.7	46.5	112.8	75.5	131.3	172.5	191.5	198.5	179.4	130.9	83.8	130.2
Volumen Vertido Amaluza historico[hm3]	5.4	0.0	1.4	0.0	4.8	20.6	50.2	159.9	49.7	34.9	14.4	10.1
Volumen Vertido Amaluza prodipa[hm3]	0	0	0	0	0	0	0	161.1	0	0	0	0
Volumen Vertido Amaluza prodipa con Mazar[hm3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

De la tabla anterior se realiza el análisis comparativo entre el histórico de la central Molino versus los resultados de prodipa sin considerar la central Mazar en primera instancia. De los valores indicados en la tabla de la producción de energía de la central Molino, estos presentan una similitud muy marcada en el periodo de análisis salvo en los meses de mayor afluencia hidrológica, donde se observa una diferencia considerable en la generación hidroeléctrica en los meses de abril, mayo, junio y julio respectivamente así como del caudal

turbinado correspondiente, figuras 5.41 y 5.42., pero la tendencia de ambas curvas se mantienen y son muy semejantes.

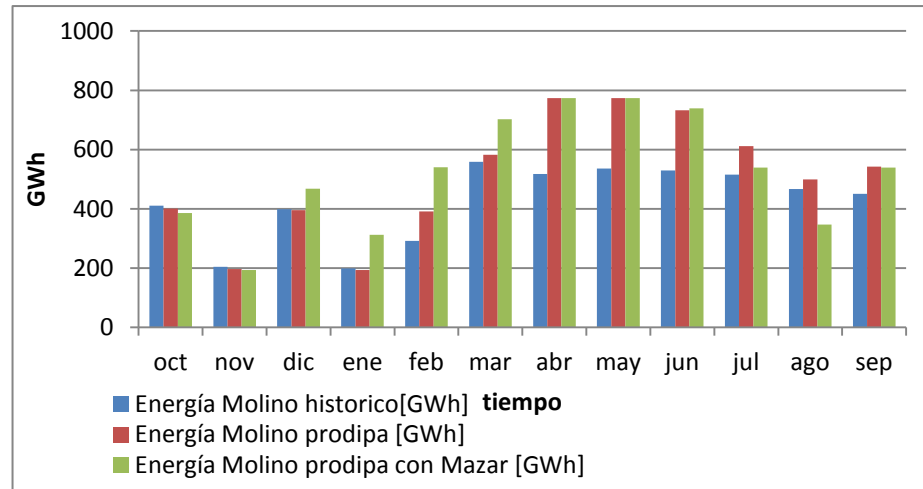


Figura 5. 41 Energía de la central Molino

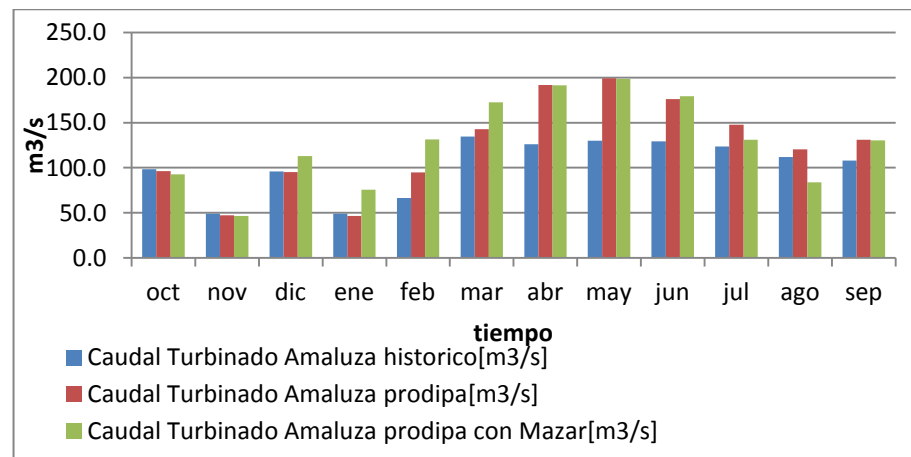


Figura 5. 42 Caudales turbinados mensuales del Embalse Amaluza

Por otro lado del análisis de los valores de vertimiento del embalse Amaluza la diferencia es muy marcada, presentando vertimiento los datos del registro histórico en meses consecutivos y el resultado de prodipa en cambio muestra un vertimiento casi completamente nulo, salvo un único mes de vertimiento que presenta similitud con el histórico este es el mes de mayo; lo detallado anteriormente se interpretaría que prodipa al realizar la maximización de la producción de energía conlleva a un mejor uso del caudal turbinado figura 5.42, provocando reducción de vertimientos en el embalse dentro del periodo de estudio.

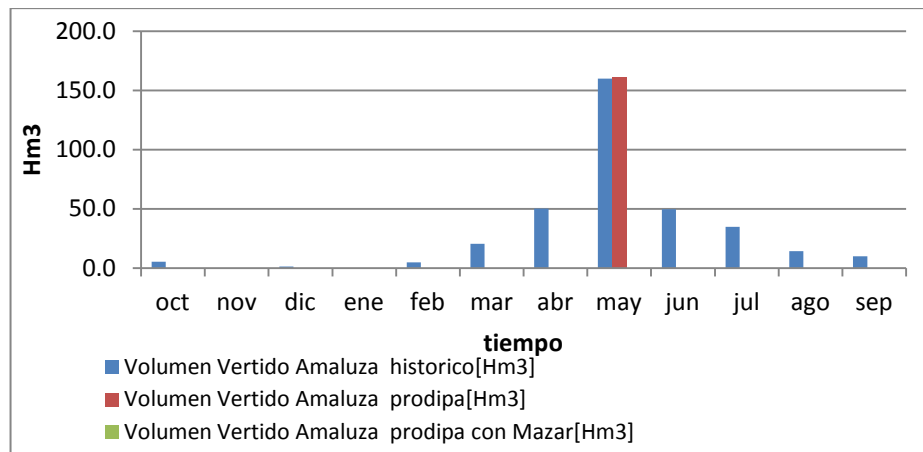


Figura 5. 43 Caudales de vertimiento mensuales del Embalse Amaluza

Continuando con el análisis, de los resultados de prodipa considerando la central Mazar se evidencia una mayor diferencia entre el registro histórico y la simulación realizada considerando a la central Molino operando aisladamente si hablamos de valores numéricos por otro lado se mantiene un poco la tendencia de las curvas. Si analizamos los resultados de producción de energía por ejemplo, se nota que en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se produce un incremento de esta producción sustancial a diferencia si se analizara únicamente la central Molino de manera aislada, en referencia con el histórico claro está.

Respecto a los caudales de turbinamiento, los mismos presentan un mayor grado de utilización inclusive en meses de mejor afluencia hidrológica, específicamente en el mes de enero que presenta un caudal de turbinamiento en la central Molino inclusive mayor a la simulación de prodipa sin considerar la central Mazar, por lo tanto el uso del turbinamiento de la central Molino se ve mejorado con la inclusión de la operación del embalse de Mazar; por otro lado si se observa en la figura 5.43 existe una reducción total del volumen de vertimiento es decir es completamente nulo, por lo tanto a breves rasgos se puede decir que con una trayectoria óptima de los niveles del embalse de Mazar figura 5.45 este embalse (Mazar) ayuda a reducir los vertimientos en el embalse de Amaluza y aprovechar óptimamente el turbinamiento en la central Molino, pero para tener un mejor criterio de comparación de los resultados de prodipa considerando a Mazar estos se estudiarán más adelante en la sección 5.3.

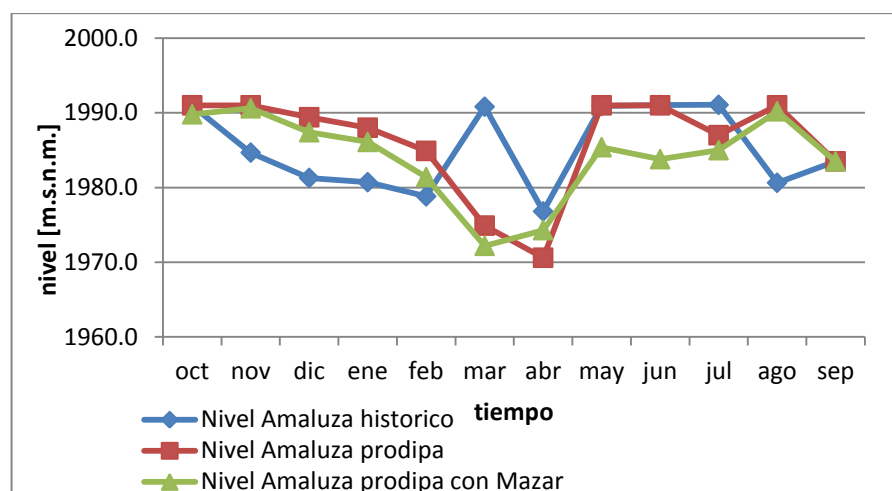


Figura 5. 44 Nivel del embalse Amaluza

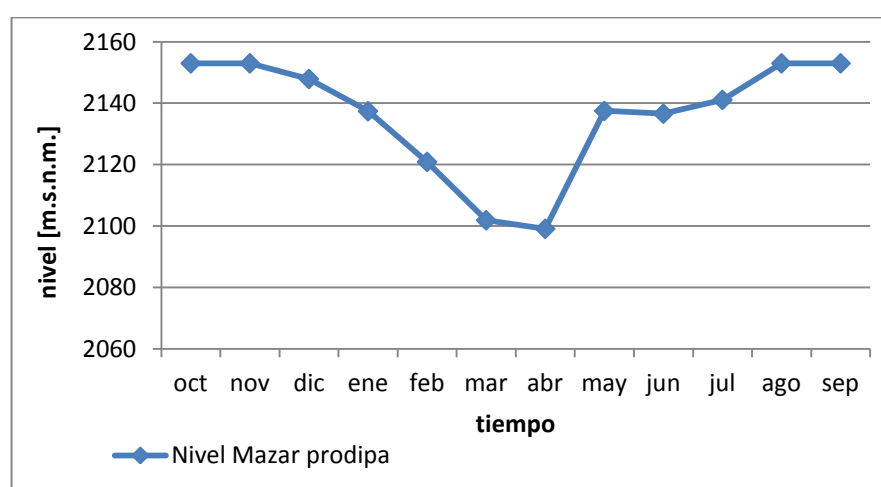


Figura 5. 45 Nivel del embalse Mazar

De lo expuesto en esta sección se puede establecer por lo tanto que las diferencias entre la estadística y las simulaciones con prodipa del año hidrológico 1999-2000 son en algunos meses muy reducidos y no existe una diferencia marcada en la tendencia de las curvas de producción por ejemplo, es decir se está comprobando que el algoritmo desarrollado está mostrando su funcionalidad ofreciendo valores valederos dentro de sus resultados. A más de mostrar su funcionalidad ya con estas simulaciones el análisis comparativo del periodo octubre 1999 – septiembre 2000 está presentando ciertas particularidades marcadas principalmente en el caudal de vertimiento y en el uso de los caudales de turbinamiento de la central Molino claro está en algunos meses, por ende el algoritmo muestra una mayor producción de energía de la central Molino, esto se entendería ya que “prodipa” está efectuando la maximización de la producción hidroeléctrica del complejo Paute, posteriormente este tema se ampliará con los resultados del análisis de las simulaciones presentadas en la próxima sección.

### 5.3 SIMULACIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS

Con el programa desarrollado producto de esta tesis basado en el objetivo de maximizar la producción del complejo hidroeléctrico Paute, se realizaron algunas simulaciones bajo diferentes escenarios para mostrar en base a algunos análisis los resultados que ofrece “prodipa” al analista, para esto se establecieron tres consideraciones básicamente para este tema, es decir se realizaron tres simulaciones la primera enmarcada en el análisis del periodo histórico, la segunda simulación considera el análisis del periodo anual versus la programación que realiza el CENACE con el plan anual del SNI, y finalmente se realiza una simulación considerando las series de caudales generados.

Las simulaciones descritas en el párrafo anterior se detallan en los próximos puntos de esta sección.

#### 5.3.1 SIMULACION DEL PERIODO HISTORICO

En este punto se realiza el análisis determinístico del modelo con la consideración de la estadística histórica de los caudales de la cuenca involucrados, es decir para esta simulación se hace la consideración que los caudales registrados históricos se pueden volver a repetir. El periodo para este análisis comprende entre 1994 hasta 2011.

Este análisis se enfoca en mostrar la influencia que presenta la inclusión del embalse y la central Mazar dentro del complejo hidroeléctrico Paute respecto a la maximización de producción de energía eléctrica y operación de sus embalses, para esto se estableció una simulación considerando la operación de la central Molino de manera aislada y otra simulación considerando la operación del embalse y la central Mazar con la central Molino dentro del periodo de estudio, se realiza estas simulaciones con la finalidad de tener un punto de comparación, cabe recalcar que ambas simulaciones realizan la maximización de la producción de energía, los resultados de las simulaciones indicadas se presentan en el Anexo N y O respectivamente.

Del análisis determinístico del periodo histórico de los registros de caudales entre 1994 y 2011 brindan ciertos rasgos característicos del complejo hidroeléctrico Paute que es necesario exponerlos para su mejor entendimiento.

Sobre la producción de energía de la central Molino si se realiza el análisis comparativo sobre estas simulaciones se puede observar que el promedio mensual de energía de Molino de manera aislada es de 457,2 GWh y cuando se

incluye Mazar es de 471,1 GWh, por lo tanto la generación de energía de la central Molino se ve incrementada en promedio 3,03% mensualmente cuando se simula las dos centrales en conjunto, esto representa un incremento mensual de 13,8 GWh aproximadamente en la producción de la central Molino. Del análisis la producción de la central Mazar contribuye en promedio mensualmente con 71,7 GWh al SNI, que representa mensualmente el 15% de producción de la central Molino aproximadamente. En las figuras siguientes 5.46, 5.47 se indican los resultados de la producción de energía de las dos simulaciones analizadas.

De acuerdo a las simulaciones realizadas en este punto con el planteamiento de que la central Molino opera conjuntamente con Mazar y la central Molino opera aisladamente del complejo; al realizar esta comparación en su operación, los resultados reflejan el aumento real en la generación de energía de la central Molino, y por consiguiente, la cantidad de energía a largo plazo que Molino puede aportar al sistema nacional Interconectado en función de la maximización de la producción del complejo Paute.

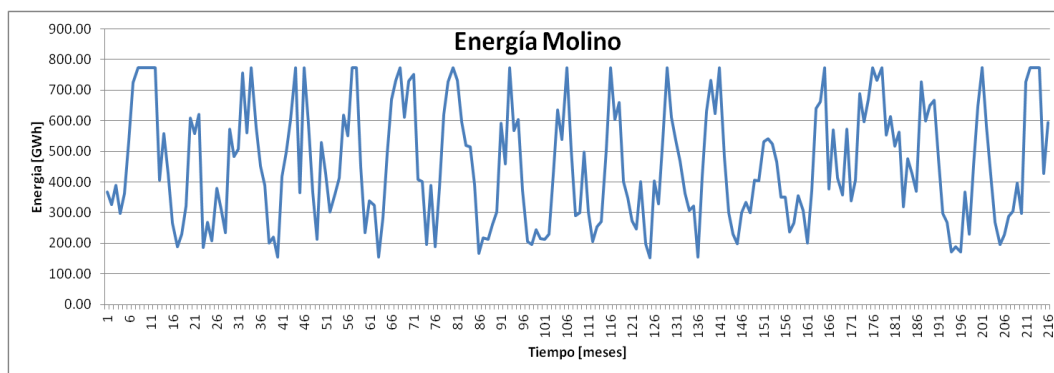


Figura 5.46 Producción de energía de la central Molino periodo 1994-2011 de manera aislada

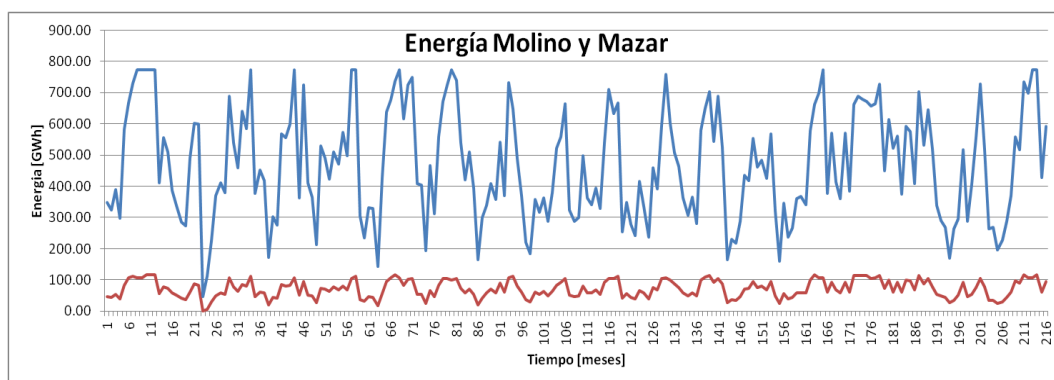


Figura 5.47 Producción de energía para las centrales Molino y Mazar periodo 1994-2011 de manera conjunta

Del análisis respecto a los niveles del embalse Amaluza estos se ven influenciados directamente con la inclusión de Mazar tal como se puede apreciar en la figuras 5.48, en la simulación analizada con el histórico sin Mazar los niveles del embalse Amaluza en su periodo anual deben disminuir considerablemente para recibir las altas afluencias hidrológicas en la estación lluviosa de la cuenca, es decir en promedio los niveles llegan a la cota de 1 975 m.s.n.m. aproximadamente en su punto más bajo y en algunos casos cerca del límite inferior operativo del embalse. No así con la operación en conjunto de Molino y Mazar, los niveles en promedio del embalse Amaluza no son tan bajos estableciéndose una cota promedio de 1 980 m.s.n.m. aproximadamente, salvo en algunos casos que necesariamente la cota debe disminuir para recibir las afluencias altas de los caudales (años hidrológicos húmedos).

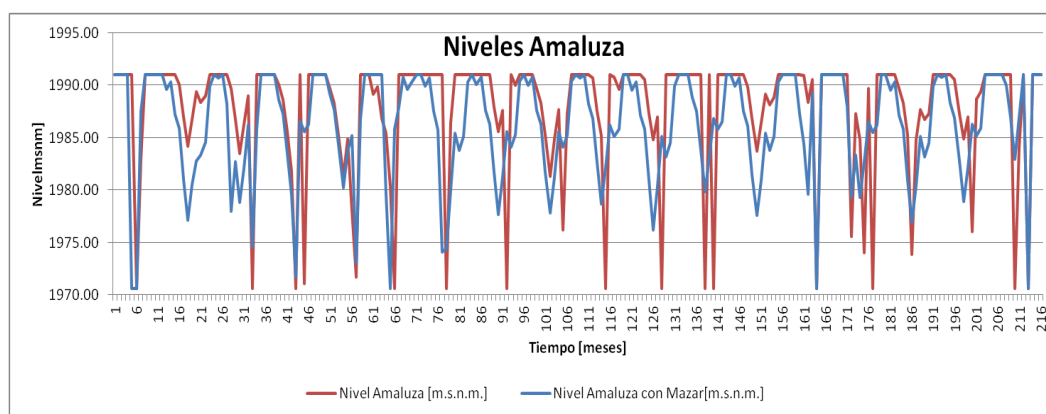


Figura 5. 48 Nivel del embalse Amaluza

De lo anterior surge un aspecto importante del análisis, la inclusión de Mazar en el complejo hidroeléctrico Paute influye en los niveles que debe mantener el embalse Amaluza en su periodo anual, que en promedio deben mantenerse en cotas altas y disminuir su volumen para recibir en los meses del periodo lluvioso la hidrología alta.

Otro rasgo importante del análisis es la disminución considerable de los volúmenes de vertimiento que antes presentaba el embalse Amaluza que en algunos casos (años hidrológicos húmedos) eran considerables, con la inclusión de Mazar este aspecto se ve mejorado considerablemente.

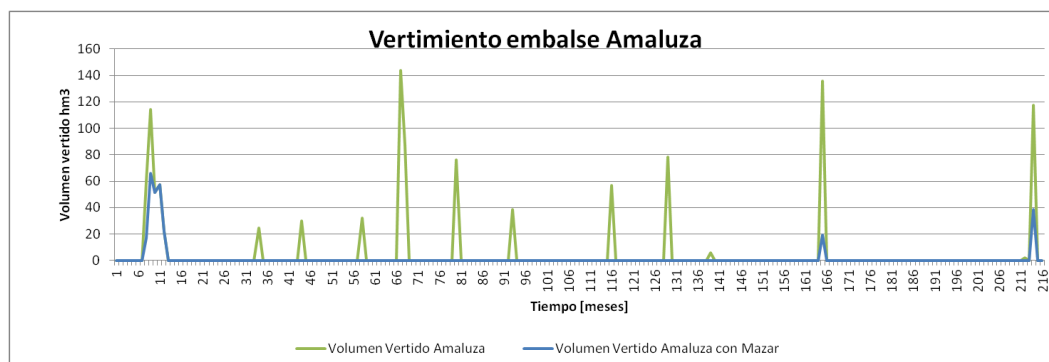


Figura 5. 49 Vertimiento del embalse Amaluzá

Finalmente el análisis de manera general muestra la influencia que presenta la central Mazar hacia el complejo hidroeléctrico Paute especialmente en los siguientes puntos: contribución mensual a la generación de energía, regulación de caudales hacia la central Molino mediante su embalse o los caudales de turbinamiento en función de sus dos unidades de generación, aumentar la producción de energía de la central Molino y disminución del volumen de vertimiento del embalse Amaluzá.

### 5.3.2 SIMULACION PRODIPA VERSUS EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SNI DEL CENACE

Como se indicó en secciones anteriores de esta tesis “prodipa” resuelve el modelo del complejo hidroeléctrico Paute de manera puntual, focalizado en su propio sistema hídrico de centrales y embalses en cascada, es por eso que dentro de su algoritmo no toma en cuenta ciertas consideraciones del sistema nacional interconectado, tal como lo realiza el CENACE dentro de su modelación del sistema para elaborar el plan anual de operación. El CENACE trimestralmente analiza el modelo del SNI y presenta los resultados en el plan anual de operación del sistema nacional interconectado, de acuerdo con lo establecido en la normativa (literal i, del artículo 24 de la LRSE) [29].

Por lo tanto para este análisis se enfatiza que el punto de comparación entre los resultados de la simulación de “prodipa” y los resultados que facilita el CENACE dentro del plan de operación del SNI solo se enmarca en la operación de las centrales de Mazar y Molino y con el manejo de sus embalses correspondientes, es decir solo se comparan los resultados de manera puntual con lo que respecta al complejo hidroeléctrico Paute versus el plan de operación del SNI.

Esta “comparación” tiene la finalidad de mostrar o asimilar los resultados del algoritmo desarrollado “prodipa” versus los resultados del complejo Paute dentro del plan anual del SNI; con el fin de establecer de ser el caso cuan cerca o lejos se encuentran estos resultados del análisis global presentado por el CENACE a



sabiendas que no se busca que los resultados sean iguales por los motivos expuestos anteriormente, esta “comparación” se argumenta aún más ya que en la actualidad el complejo hidroeléctrico Paute tiene una marcada influencia en la operación del sistema nacional interconectado.

Con este antecedente se ha corrido “prodipa” para establecer una asimilación con los resultados del Plan de operación del sistema nacional interconectado en dos periodos de ejemplo, el periodo octubre 2011-septiembre 2012 [69] y enero 2012-diciembre 2012 [70] considerando los datos iniciales de los niveles del embalse de Mazar y Amaluza de acuerdo al plan emitido por el CENACE y la información actualizada del programa anual de mantenimiento emitido por la unidad de negocio Hidropaute para sus centrales Mazar y Molino, los mismos que constan dentro del Plan de operación del CENACE.

En el Anexo P se muestra el programa de mantenimiento de las central de Mazar y Molino emitido por Hidropaute tiempos que son considerados para los análisis.

De igual manera que los resultados del Plan de operación del sistema nacional interconectado se realiza el análisis de acuerdo a la hidrología estimada en la cuenca del rio Paute es decir se analiza de manera similar tres escenarios, un escenario con afluencia media histórica y escenarios con probabilidades de excedencia del 10 y 90%. Cabe mencionar que los resultados que presenta el Plan de operación del SNI del CENACE tanto para la hidrología media, 10 y 90 % de excedencia (hidrología alta y baja por llamarlo de alguna manera) son los resultados del análisis de cincuenta escenarios hidrológicos [69]. Por lo tanto “prodipa” para asemejarse a lo indicado anteriormente para su análisis considera los percentiles del 10 y 90 % de los registros históricos de caudales promedio mensuales.

De acuerdo a los resultados del Plan de operación del sistema nacional interconectado en el periodo octubre 2011 – septiembre 2012 publicado por el CENACE en el Anexo Q se muestran los resultados relevantes para el complejo hidroeléctrico Paute, así como los resultados que brinda “prodipa”; en el anexo se resume la producción de energía, el nivel del embalse, y volumen de vertimiento de los embalses. De manera similar que el periodo octubre 2011 – septiembre 2012 se presenta en el Anexo R los resultados del plan anual del SNI y los resultados de “prodipa” del periodo enero 2012 – septiembre 2012.

A continuación se realiza un resumen del análisis comparativo de resultados de los dos periodos estudiados bajo los escenarios de una hidrología alta, media y baja.

### 5.3.2.1 ANALISIS DE PRODIPA VS EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO PERIODOS (OCTUBRE 2011-SEPTIEMBRE 2012) – (ENERO 2012 – DICIEMBRE 2012)

#### PERIODO OCTUBRE 2011-SEPTIEMBRE 2012

De las simulaciones realizadas y en base a los valores de las tablas mostradas en los Anexos R y S a continuación se presentan algunos cuadros comparativos de los resultados obtenidos entre prodipa (color azul) vs Plan de operación del SNI del CENACE (color rojo)

#### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

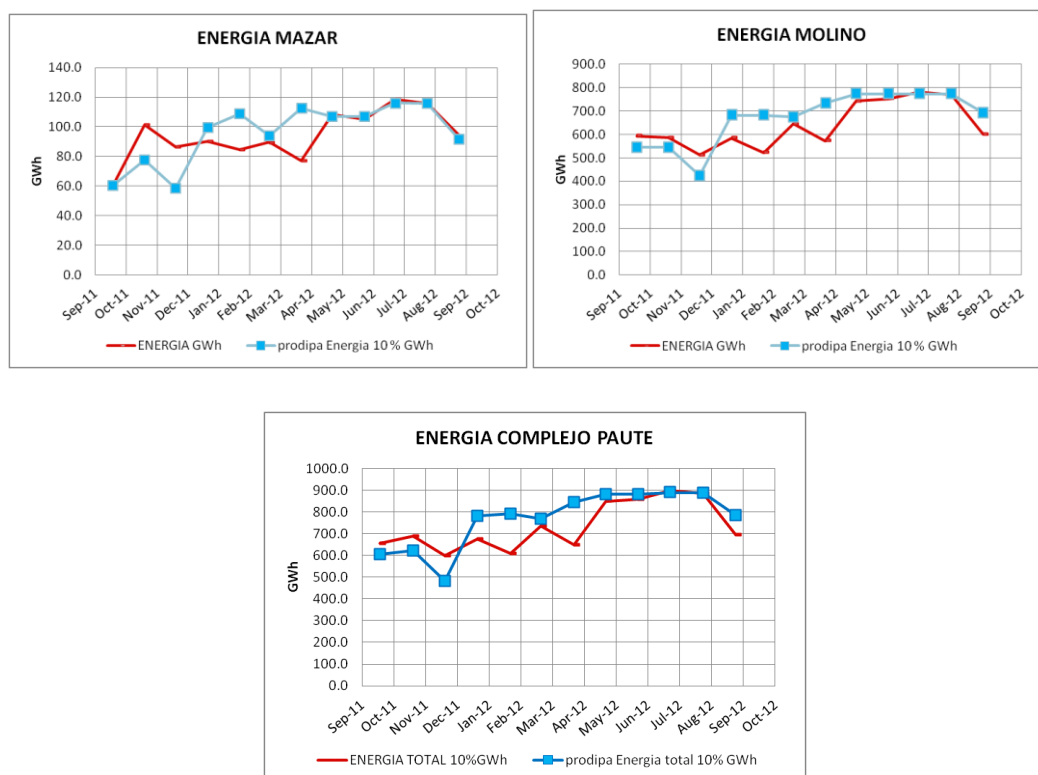


Figura 5. 50 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

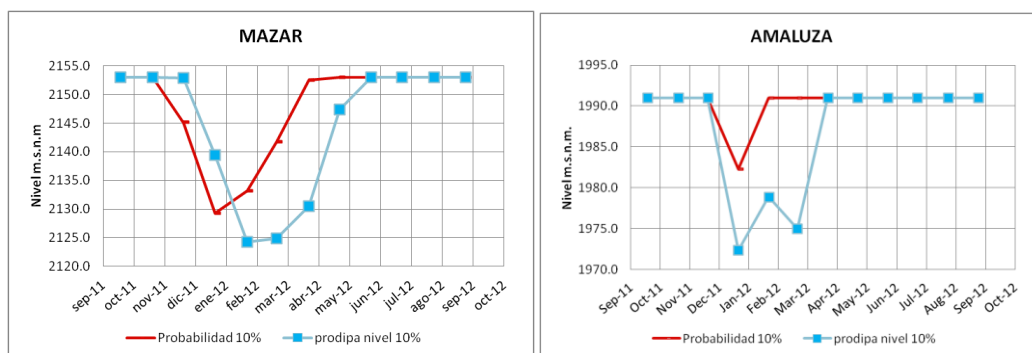


Figura 5. 51 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

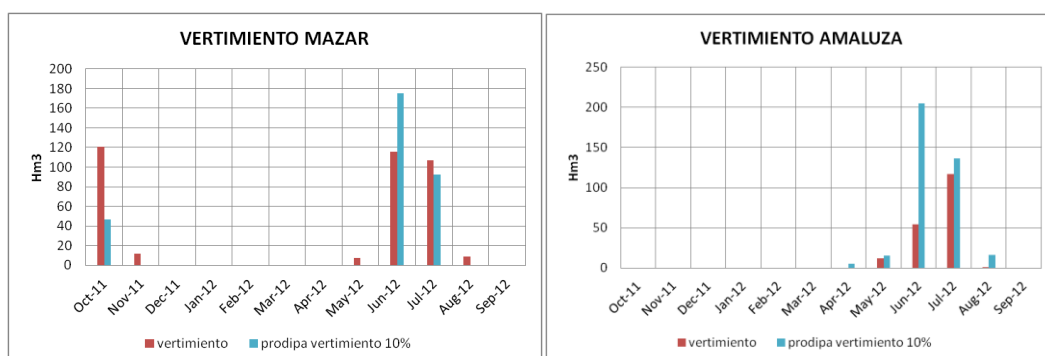


Figura 5. 52 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

## Hidrología Promedio

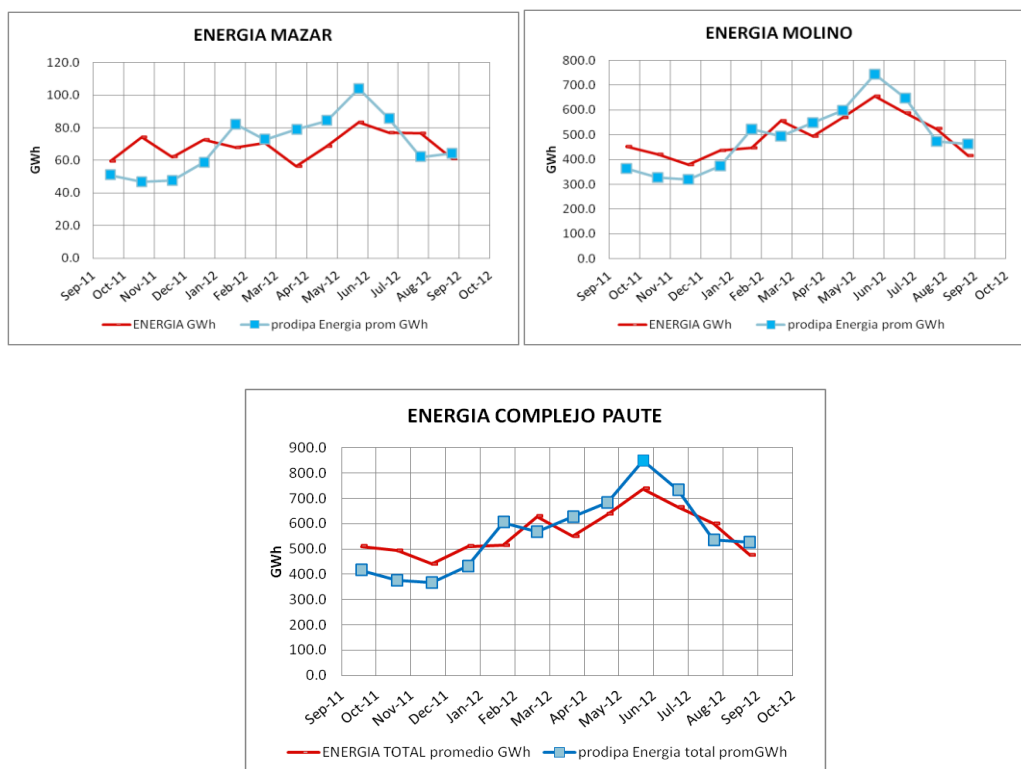


Figura 5. 53 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

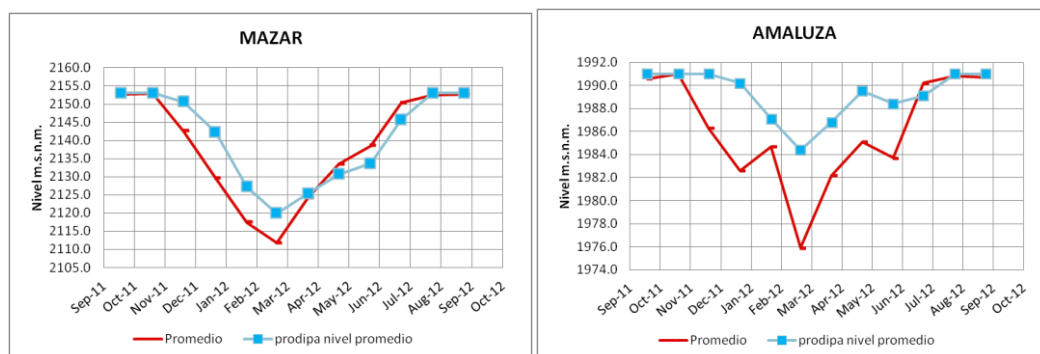


Figura 5. 54 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI

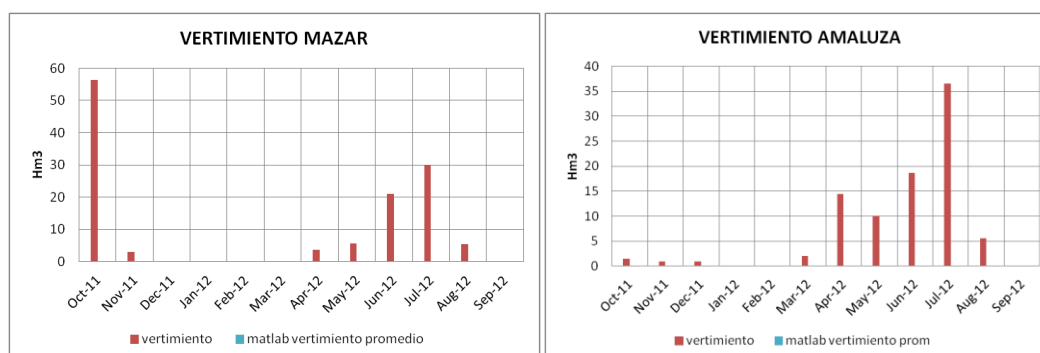


Figura 5. 55 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

### Probabilidad del 90 % de excedencia hidrológica

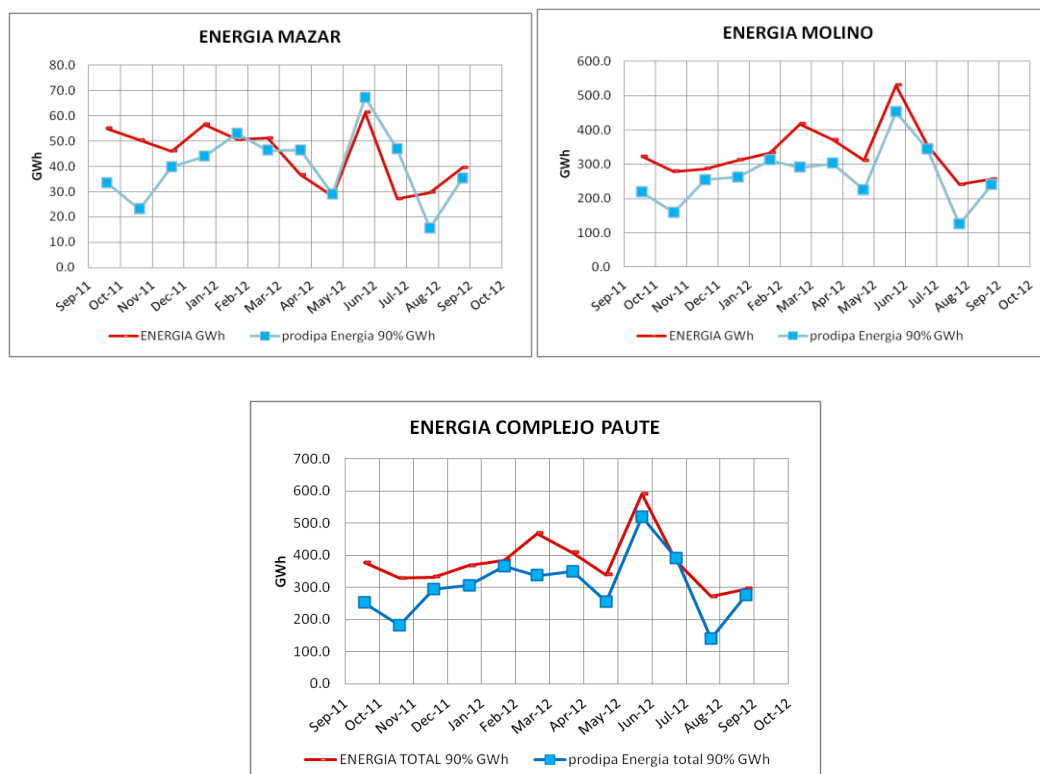


Figura 5. 56 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

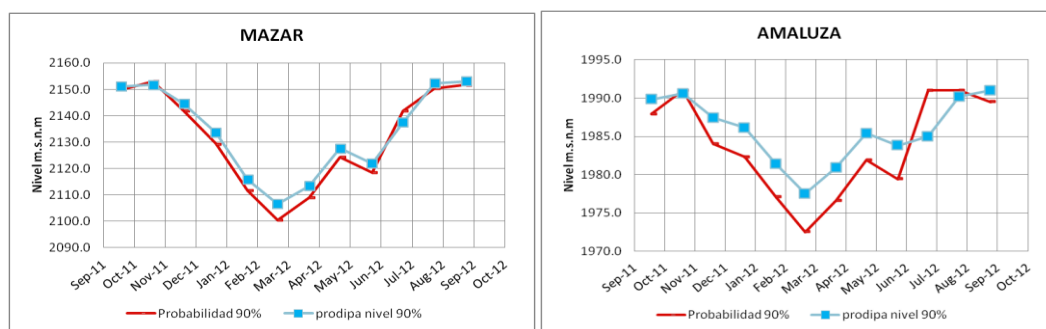


Figura 5. 57 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI

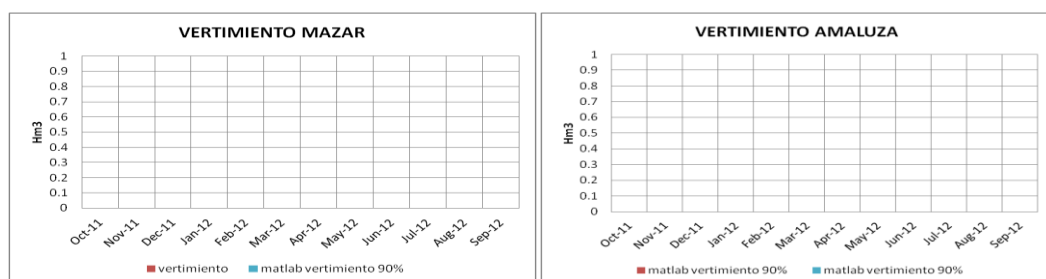


Figura 5. 58 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI

### PERIODO (ENERO 2012 – DICIEMBRE 2012)

A continuación se extraen algunos cuadros comparativos para una mejor interpretación de los resultados, presentándose de color rojo los resultados por el plan de operación del SNI y de color azul los resultados brindados por prodipa.

### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

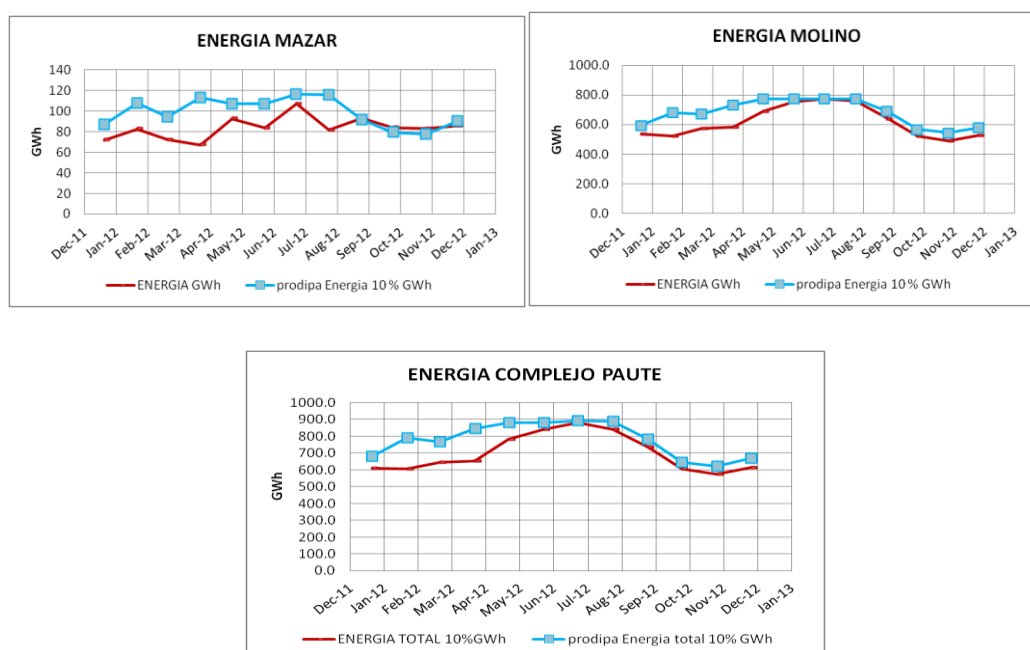


Figura 5. 59 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

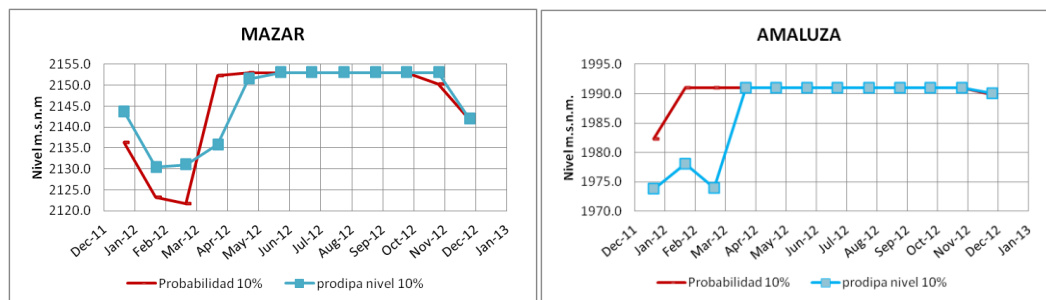


Figura 5. 60 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI

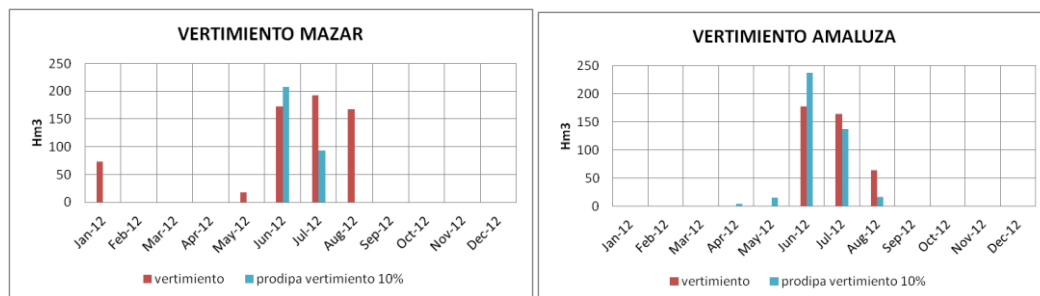


Figura 5. 61 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

## Hidrología Promedio

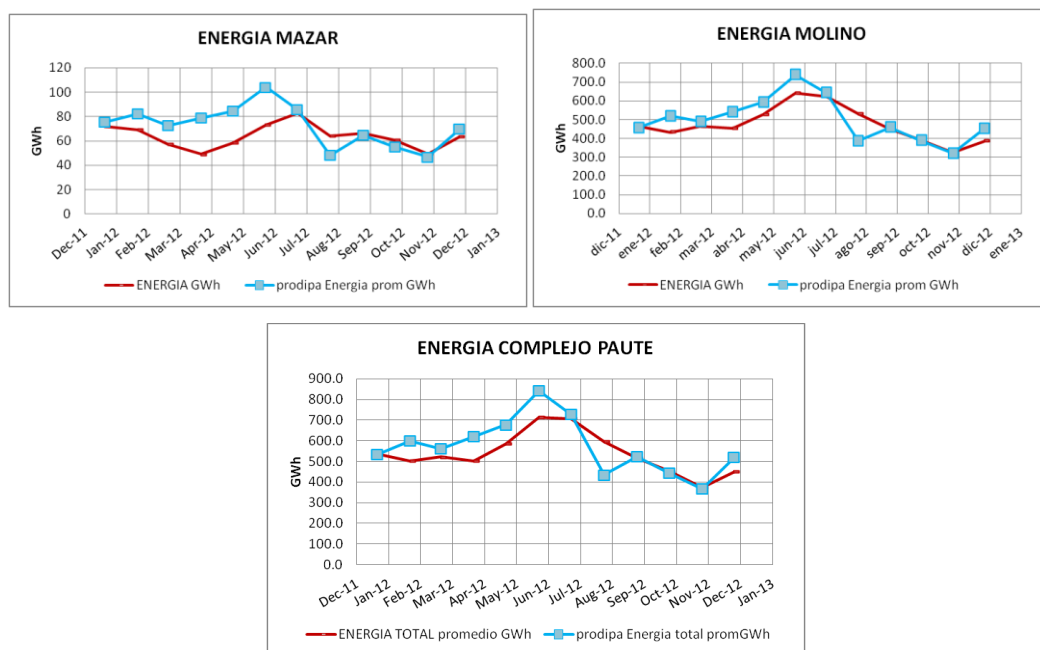


Figura 5. 62 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

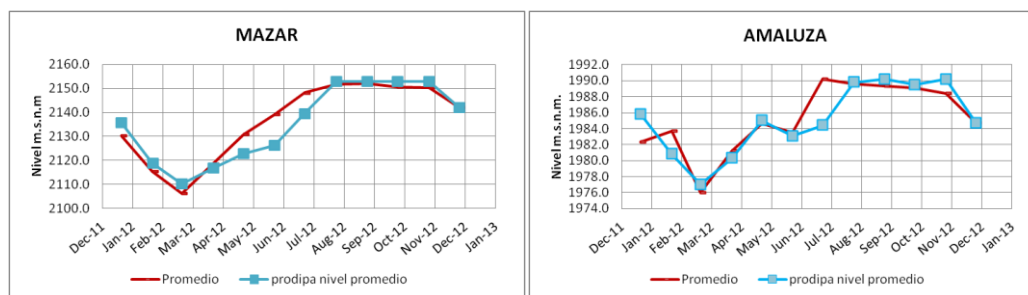


Figura 5. 63 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluz prodipa vs Plan operativo SNI

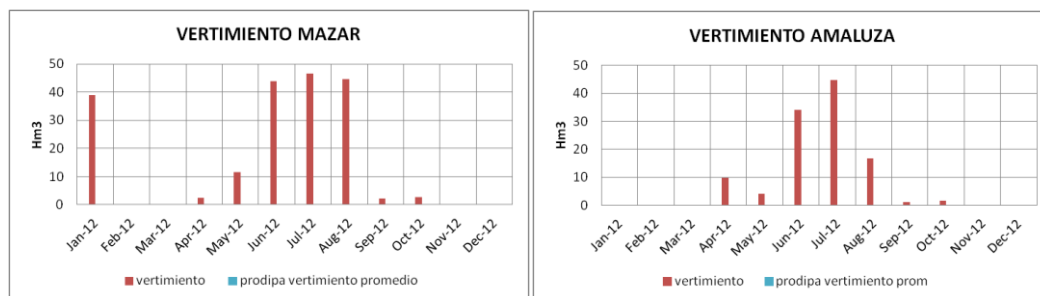


Figura 5. 64 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluz prodipa vs Plan operativo SNI

### Probabilidad del 90 % de excedencia hidrológica

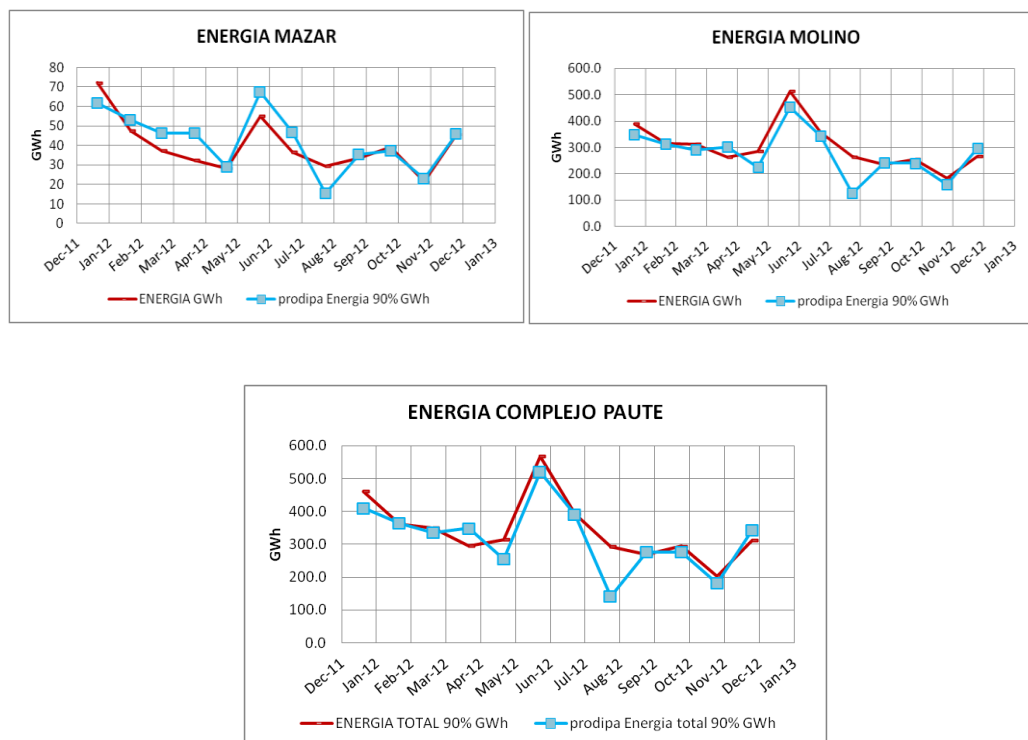


Figura 5. 65 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

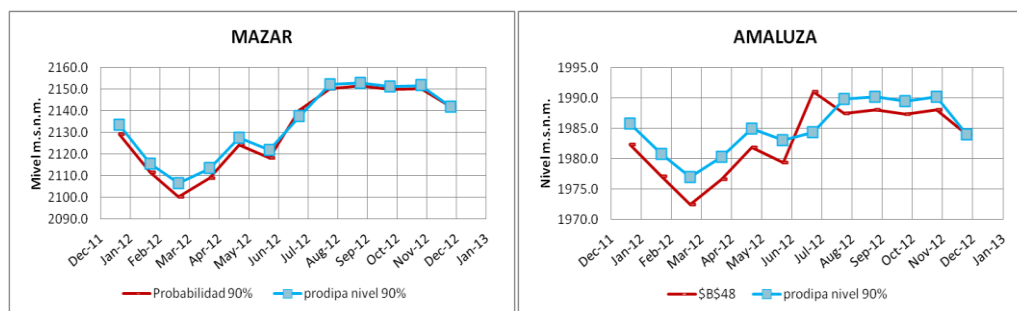


Figura 5. 66 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

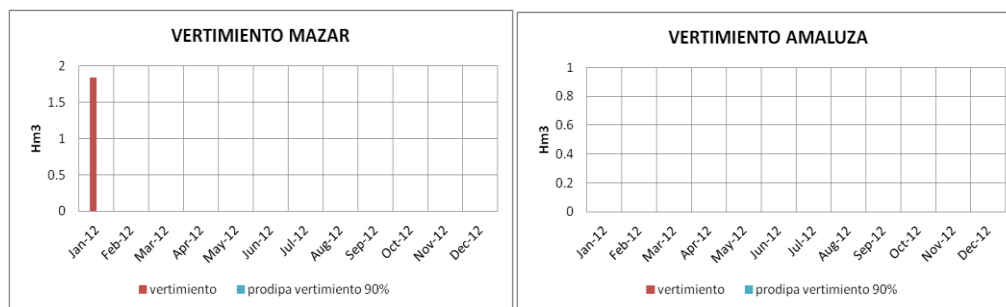


Figura 5. 67 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

De los dos ejemplos de aplicación analizados, se extraen algunos comentarios en base a los cuadros comparativos mostrados anteriormente, primero que en los dos ejemplos estudiados se ve claramente que los resultados entre prodipa y los resultados del Plan de operación del sistema nacional interconectado publicado por el CENACE tienen de forma general valores muy parecidos y sus tendencias en algunos casos su similitud es muy marcada, es decir en algunos meses la semejanza de los resultados son muy parecidos tal es el caso del análisis con hidrología media y con la excedencia del 90%, (en el caso de prodipa se ha utilizado el percentil 90 y el promedio de los registros históricos de los caudales de la cuenca del Paute), esta singularidad está basada en los resultados de la producción de energía y de las trayectorias de niveles de los embalses.

Por ejemplo para el análisis de la producción de energía de todo el complejo Paute dentro del periodo de estudio enero 2012- diciembre 2012 (un año), los valores analizados que brinda “prodipa” en relación con los del plan del SNI presentan un error de desviación promedio (anual) de 16,7% para el escenario de hidrología alta, 15,8% para el escenario de hidrología media y 15,3% para el escenario de hidrología baja aproximadamente.

En el escenario de la excedencia del 10% los resultados de las trayectorias de los embalses de Mazar y Amaluza en algunos meses difieren



considerablemente, cabe recordar que prodipa no considera dentro de su algoritmo las variables consideradas dentro del modelo del SNI tales como demanda, combustibles y demás generadores por citar algunas de ellas con esto se entendería en parte que en algunos meses las curvas difieran de manera considerable.

La otra variable analizada en este apartado es el volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza como se pudo apreciar en los dos periodos de análisis en ciertos meses la similitud de prodipa es muy cercana al Plan operativo pero la mayoría del tiempo así como los escenarios planteados para el análisis no concuerdan, proporcionando prodipa resultados menores o nulos que el plan, es decir, prodipa al realizar la optimización de la producción de energía de las dos centrales Mazar y Molino el resultado de los volúmenes de vertimiento de los embalses involucrados son reducidos o casi no se presentan, eso si no son totalmente nulos.

Es decir cuando en ciertos meses se presentan hidrologías altas a pesar de realizar una optimización del recurso del agua en el embalse se presentan vertimientos en el caso del embalse de Mazar y de menor proporción en el embalse de Amaluza, siendo el volumen de vertimiento en este último como no aprovechable para la generación de energía, ya que en el caso de presentarse vertimiento en el embalse de Mazar este volumen de ser el caso se turbinaría en la central Molino que se encuentra aguas abajo de Mazar y no así si se vertiera en Amaluza, (esto se entendería en las condiciones actuales que presenta el complejo Hidroeléctrico Paute, pues de construirse las otras centrales del proyecto a futuro se aprovecharía tal vertimiento para la generación de energía en dichas centrales de generación).

Así también como se indicó a inicios de este apartado los resultados que presenta el Plan de operación que emite el CENACE trimestralmente es el resultado del análisis de 50 escenarios hidrológicos que de manera estocástica fueron utilizados por el software SDDP para realizar dicho plan tal como lo establece la normativa, por lo tanto se puede indicar de manera muy aproximada el algoritmo desarrollado fruto de este proyecto brinda análisis o estimaciones rápidas con similitudes valederas versus el plan de operación del SNI. Por lo que “prodipa” se podría aprovechar como una herramienta de apoyo para los análisis de la programación de las centrales y embalses del complejo hidroeléctrico Paute, tomando en cuenta que la ventaja también radica en el tiempo de cálculo siendo este reducido considerando el tipo de modelo.

### 5.3.3 SIMULACION CON CAUDALES GENERADOS

Con el desarrollo de caudales generados elaborados a partir de los registros históricos de la cuenca del Paute ya sea por consultorías o por parte de algunos proyectos de Hidropaute, los caudales generados en estas consultorías son aprovechados para que el programa "prodipa" mediante su algoritmo facilite resultados optimizados y se pueda establecer el análisis a "futuro" del manejo de los dos embalses Mazar y Amaluza, así como de sus centrales Mazar y Molino, pertenecientes al complejo hidroeléctrico Paute. Prodipa utiliza las 500 series resultado del análisis de caudales en los sitios de presa Mazar-Ingapata y Amaluza del Proyecto Hidroeléctrico Paute [13].

De lo mencionado anteriormente se utiliza la interfaz "caudalgen" para la selección de caudales generados mismos que se hicieron referencia en el párrafo anterior, la extracción dependerá del valor promedio del caudal y del mes seleccionado, tomando posteriormente entre un número adecuado de series bajo el criterio del analista para su análisis.

Los resultados del ejemplo que se utilizó en la simulación de prodipa con caudales generados se presentan a la siguiente sección, la simulación se ejecutó en el periodo comprendido entre octubre 2012 y septiembre 2013

#### 5.3.3.1 RESULTADOS DE PRODIPA EN EL PERIODO OCTUBRE 2012 - SEPTIEMBRE 2013 CON CAUDALES GENERADOS

De la simulación realizada con caudales generados, en las siguientes gráficas comparativas se presentan los valores mensuales de energía, nivel del embalse, y volumen vertido de Mazar y Molino respectivamente tanto para los percentiles del 10%, 90% y promedio de los caudales generados es decir la interpretación de una hidrología alta, media y baja según los resultados de la simulación, los resultados en detalle así como los niveles iniciales de los embalses, correspondientes al 1 de septiembre de 2012 de acuerdo al plan de operación del SNI se pueden apreciar en el Anexo S.

En la figura 5.68 se observa del extracto de "caudalgen" las series generadas que se pueden considerar para el análisis de la simulación, para este ejemplo se considero 10 series tal como lo muestra la figura 5.69 así como para el caudal de aportaciones laterales.

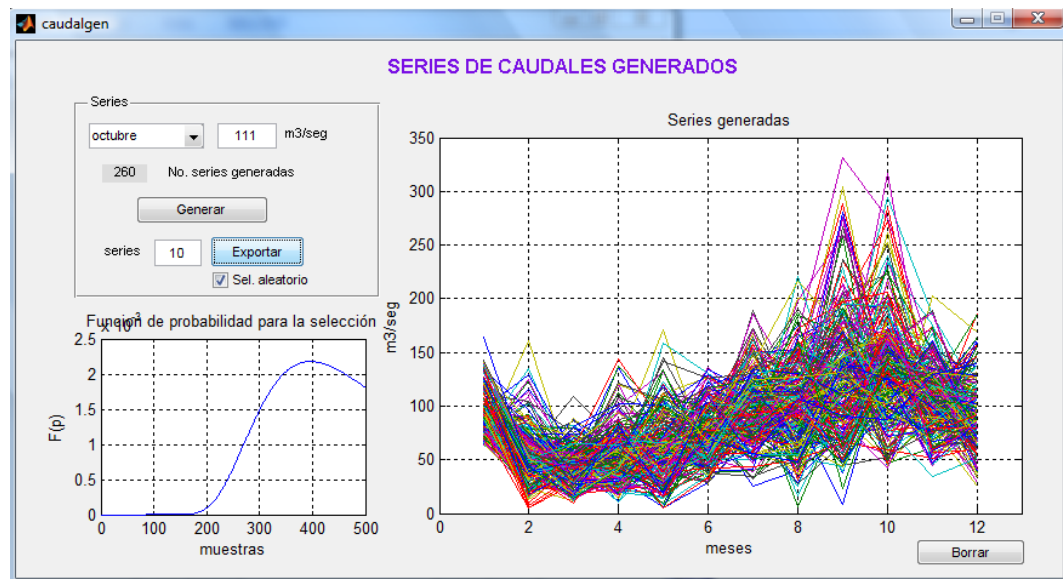


Figura 5. 68 Ejemplo de Series de caudales generados despliegue “caudalgen”

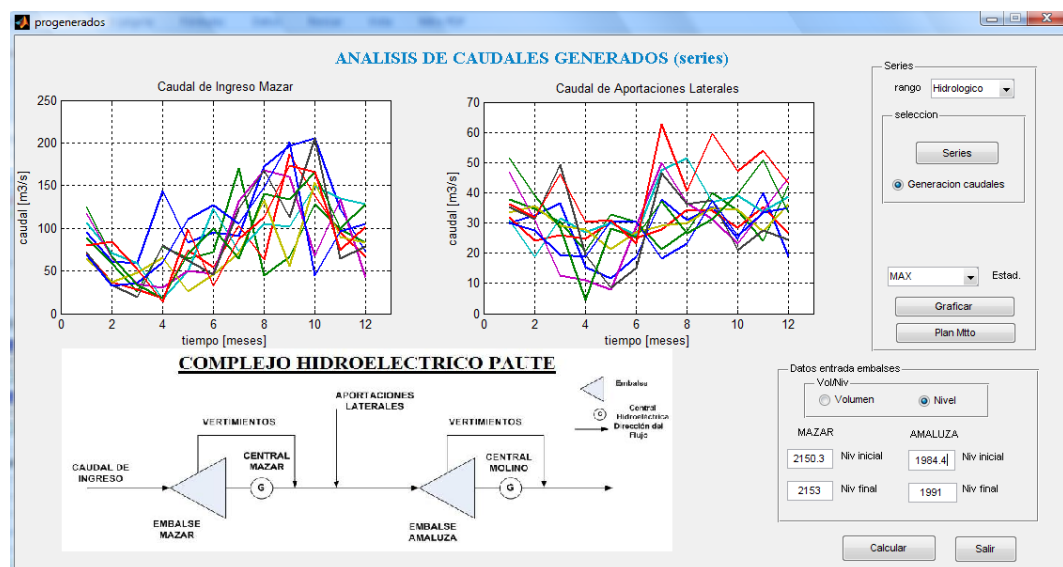


Figura 5. 69 Despliegue para el análisis del modelo con caudales generados.

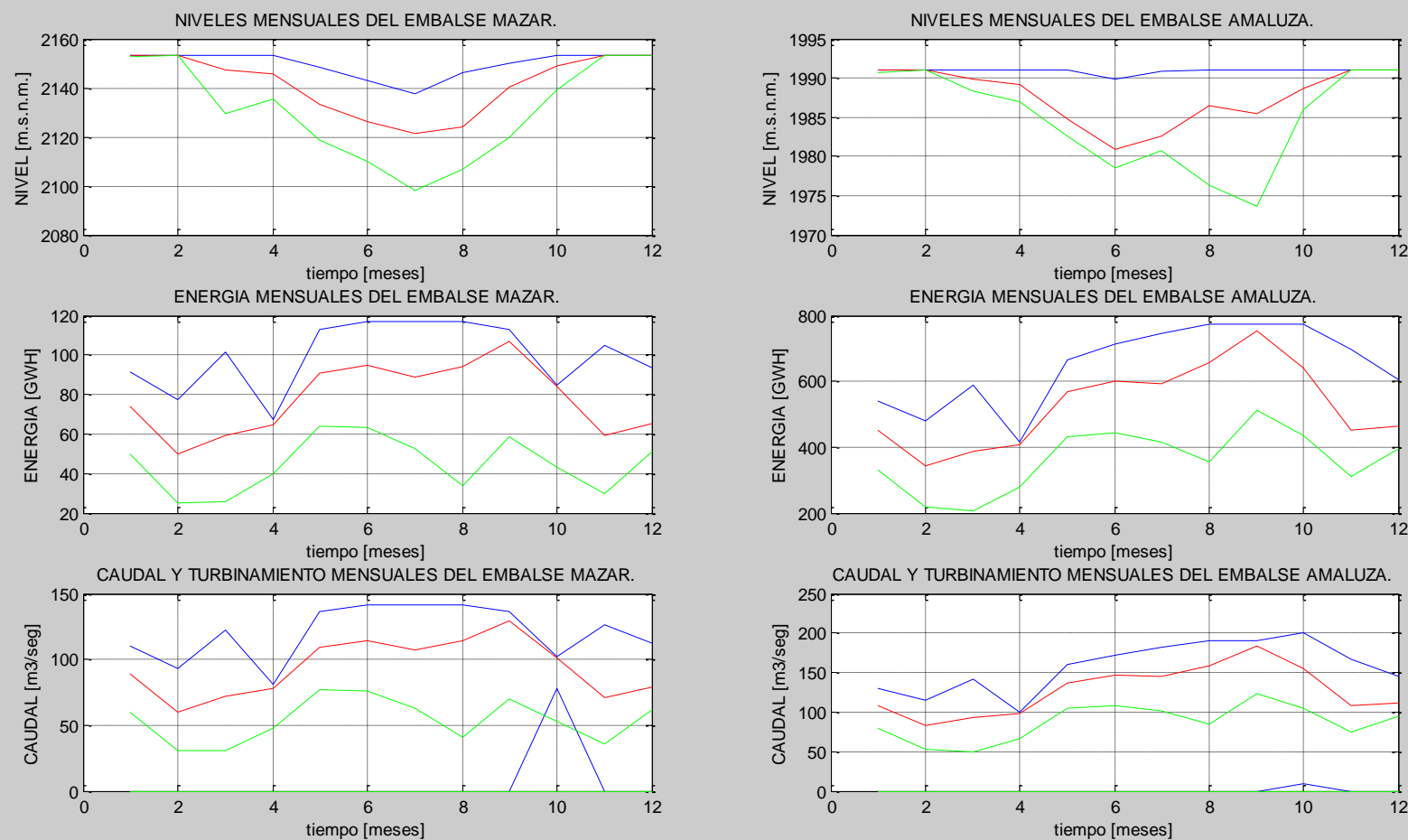


Figura 5. 70 Volúmenes del embalse, Generación de Energía y caudales de turbinamiento y vertimiento de las centrales de Mazar y Molino<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Para la interpretación de los resultados el color azul indica el percentil del 10%, el color verde el percentil del 90% y el color rojo el promedio

En la figura 5.70 se muestra los resultados brindados por prodipa gráficamente en esta figura indica la energía generada por las centrales mensualmente, los niveles mensuales de los embalses, el caudal de turbinamiento y de vertimiento del periodo en análisis.

### Percentil del 10 %

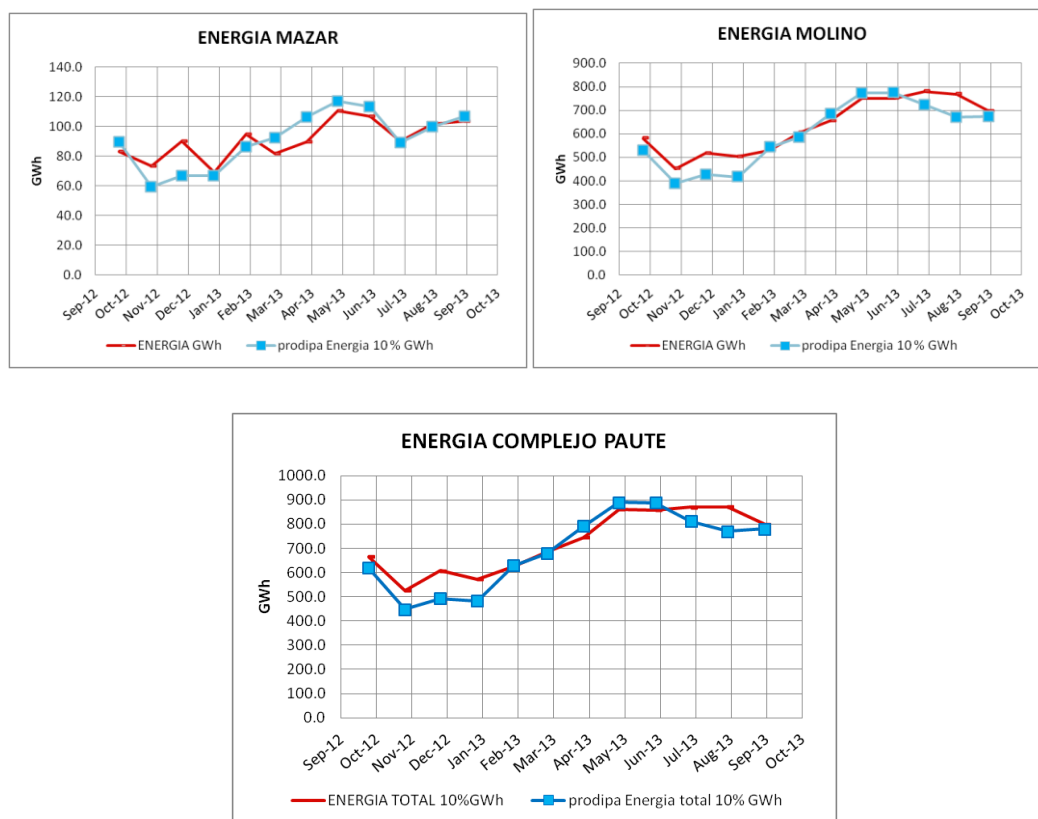


Figura 5. 71 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

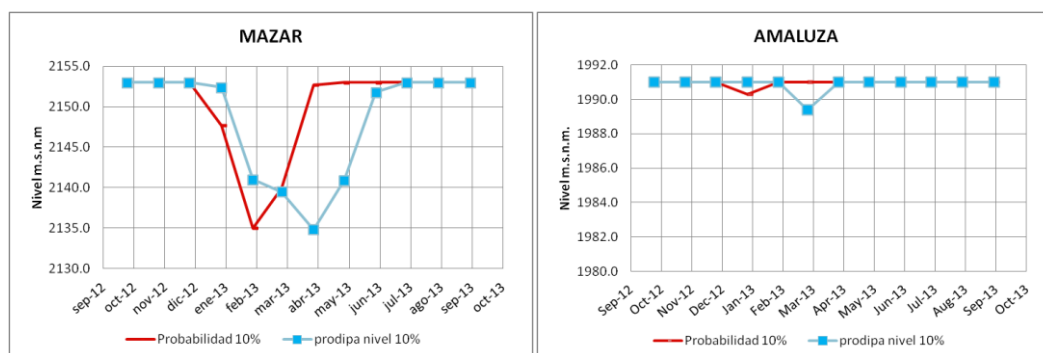


Figura 5. 72 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

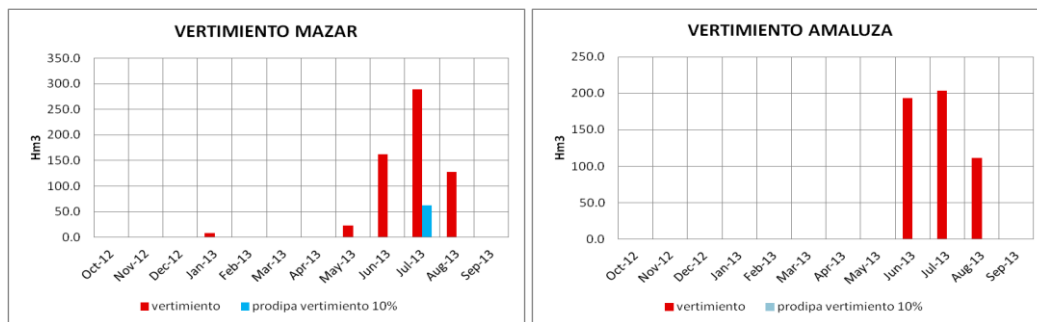


Figura 5. 73 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

### Promedio

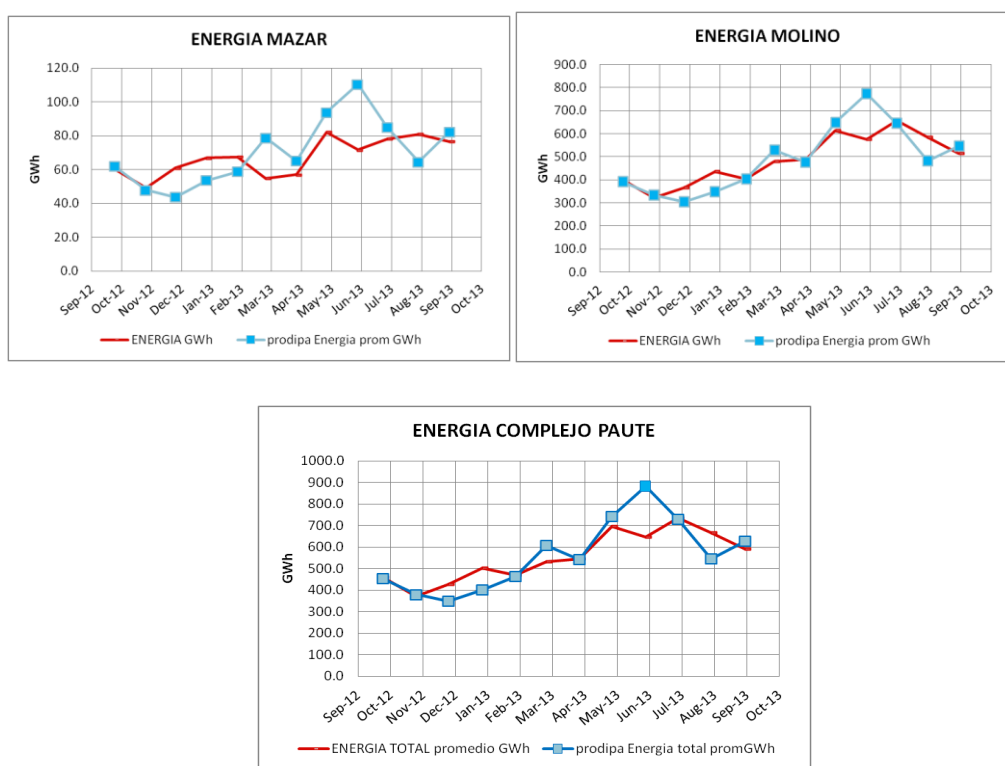


Figura 5. 74 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

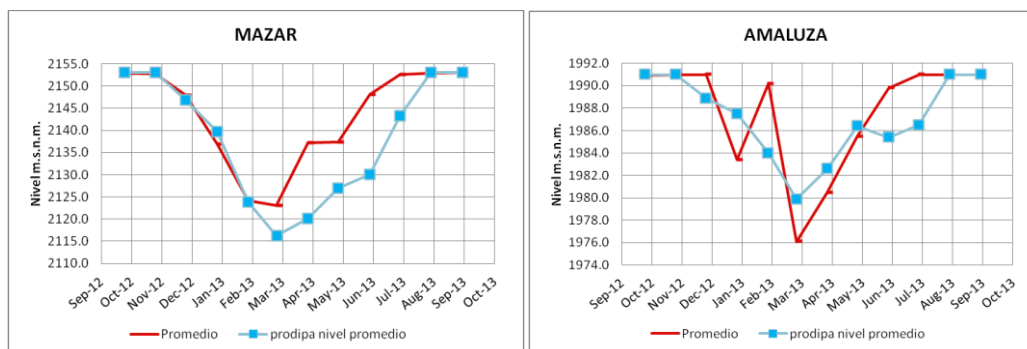


Figura 5. 75 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

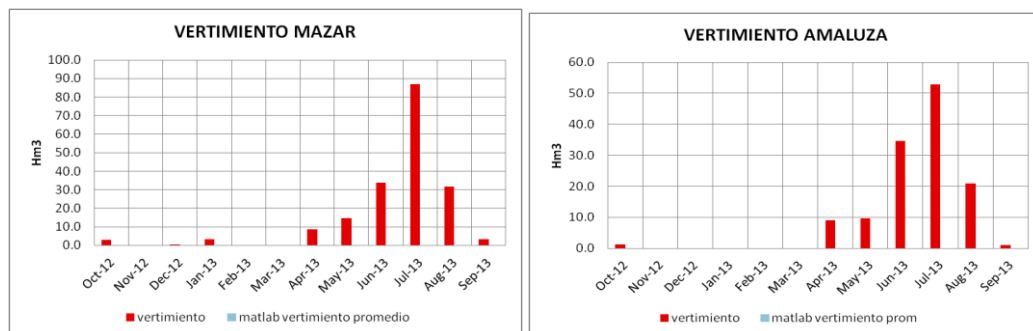


Figura 5. 76 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

### Percentil 90 %

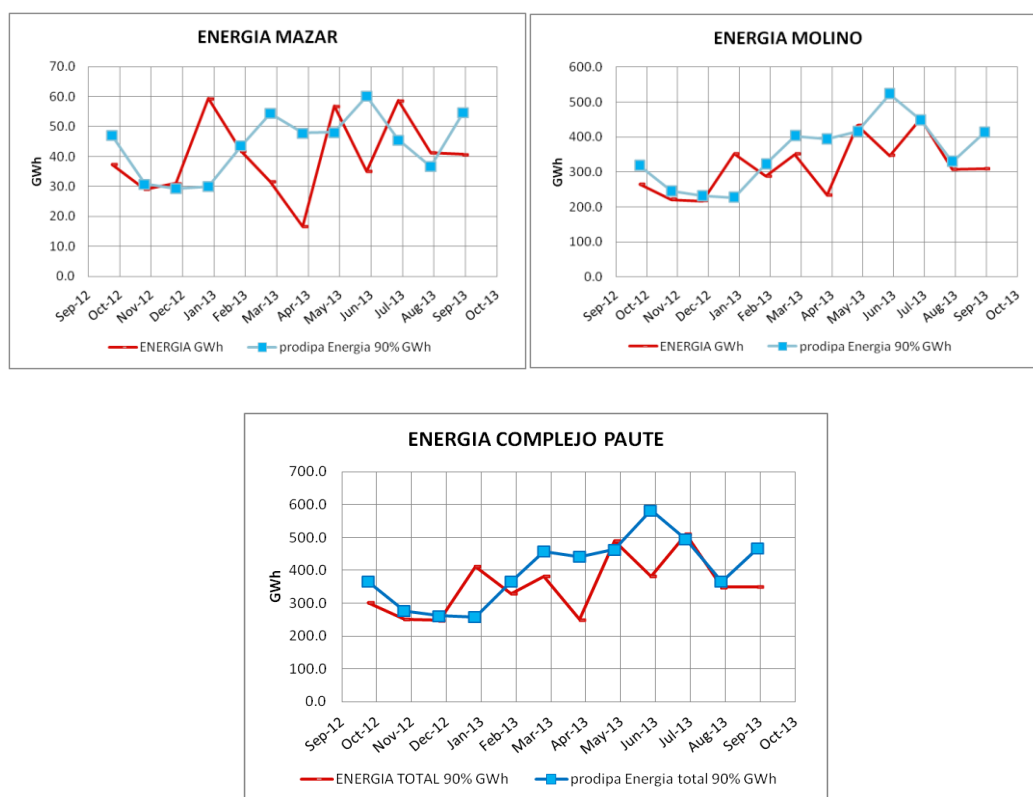


Figura 5. 77 Producción de energía de las centrales de Mazar y Molino prodipa vs Plan operativo SNI

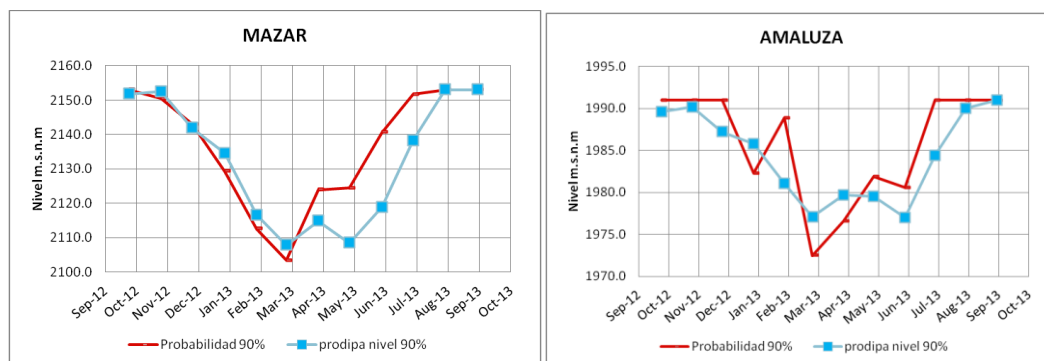


Figura 5. 78 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan del SNI

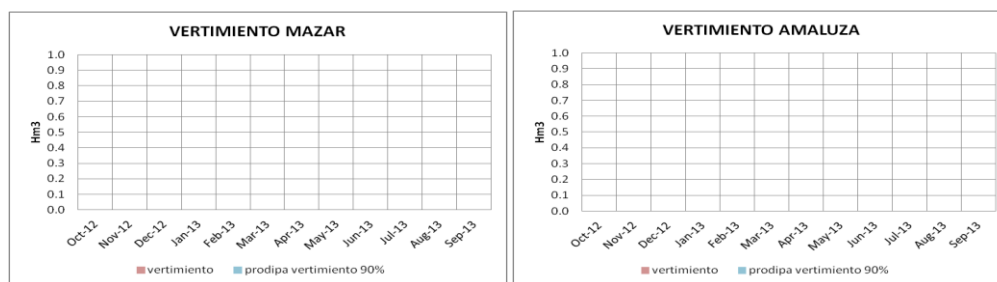


Figura 5. 79 Volumen de vertimiento de los embalses de Mazar y Amaluza prodipa vs Plan operativo SNI

De los cuadros mostrados anteriormente se establece que las comparaciones versus el plan de operación del SNI cuando “prodipa” utiliza caudales generados las variaciones en las similitudes de los resultados de la producción de energía se incrementan en la mayoría de los casos salvo algunos meses que presentan una similitud aceptable, esto se interpretaría debido que la selección de los caudales para el caso del CENACE (50 escenarios hidrológicos) y para el ejemplo de prodipa 10 series no son similares claro está, así también no se podría comparar los caudales de ingreso laterales que se utilizó para el ejemplo, que para el caso de prodipa se utilizó series generadas estimadas de la cuenca en base únicamente al promedio del histórico<sup>21</sup>.

Resumiendo el análisis, básicamente “prodipa” muestra con los resultados de sus variables tendencias que ayudaran a establecer criterios o estrategias de uso del agua de los embalses de Mazar y Amaluza, relacionados con la maximización de la producción de energía de las centrales (Mazar y Molino), siempre y cuando las condiciones hidrológicas consideradas se asemejen a la realidad. Por ejemplo, de acuerdo a las simulaciones realizadas una estrategia de operación óptima de los embalses de Mazar y Amaluza consistiría en esperar, en un nivel bajo de los embalses las crecidas que se presentan en la cuenca del río Paute durante el período lluvioso.

Finalmente para realizar un análisis comparativo cuando “prodipa” ejecuta su algoritmo con caudales generados los resultados dependerán mucho de las similitudes de los caudales utilizados por el algoritmo desarrollado en referencia con los utilizados por el software SDDP del CENACE, por lo que, para un trabajo futuro de investigación comparativo seria de utilidad para efectos de calibración o ajuste del algoritmo (series de caudales generados) se tenga la posibilidad de acceder a los valores de caudales que el CENACE utiliza cuando calcula el plan

<sup>21</sup> Para el análisis de las series generadas los caudales de ingreso laterales no están limitados únicamente al promedio de la estadística histórica sino en la gama desde su máximo, mínimo y percentiles de acuerdo al criterio y selección del analista



anual de operación del sistema. Es así que actualmente la limitación al acceso a esa información dificulta realizar dichos ajustes de ser el caso.

Así también es recomendable que para la utilización del algoritmo con caudales generados se desarrolle por la parte de Hidrología de la unidad de negocio de Hidropaute series hidrológicas de los caudales laterales actualizadas hacia el embalse Amaluza es decir se debe de considerar a futuro la generación de caudales “laterales” de la seis subcuencas importantes como son los ríos Collay, Pindilig, Mazar, Llavircay, Juval y Pulpito, y caudales naturales de menor importancia, que llegan hasta el embalse Amaluza, esto debido que los caudales mencionados presentan una influencia importante dentro del manejo del embalse Amaluza más aún cuando se realiza análisis de periodos menores de tiempo, tal es el caso por ejemplo del periodo de corto plazo que necesariamente se debe tener en consideración para el manejo de los embalses a futuro.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Por la limitaciones de acceso a la información de todo el sistema SNI, se optó por plantear el problema de esta tesis en el contexto de un sistema integrado de embalses dispuestos en serie, para dar solución al planeamiento de la operación de largo plazo de un año del complejo hidroeléctrico Paute de manera puntual, elaborando un modelo matemático en base a las características técnicas operativas en la que se que se encuentra en la actualidad el complejo
- ✓ Debido que el problema de la planificación de largo plazo para el complejo hidroeléctrico Paute involucra tomar decisiones secuenciales sucesivas entre las etapas del periodo analizado (un año) y por la información que se encontró disponible se escogió resolver el modelo matemático utilizando la técnica de la Programación Dinámica determinística.
- ✓ Por la configuración del complejo Paute (embalses y centrales en cascada) y por las características que presenta la programación dinámica multidimensional esta tesis utiliza el método de la Programación Dinámica Incremental y el método de Aproximaciones Sucesivas para reducir la carga computacional.
- ✓ Los resultados del algoritmo con la simulación de la central Molino de manera aislada, da a conocer que los altos valores de energía en algunos meses son el producto de la optimización de la producción de energía con un uso eficiente del agua de su embalse, mas no es así, cuando se compara con su registro estadístico histórico de algunos años, esto conlleva a entender que el manejo del embalse de Amaluza en años anteriores no ha sido manejado con algún planteamiento o técnica que optime este recurso, y, que se conozca claro está.
- ✓ En base que esta tesis desarrollo un modelo del complejo Paute aislado del sistema SNI, se puede estimar los beneficios directos de la central Molino, atribuibles a la central Mazar, por medio de la optimización de la producción mensual de la central Molino. Es decir, de acuerdo a las

simulaciones realizadas en el capítulo anterior con el planteamiento de que la central Molino opera conjuntamente con Mazar y la central Molino opera aisladamente del complejo al realizar esta comparación de su operación, refleja el aumento real en la generación de energía de la central Molino, y por consiguiente, la cantidad de energía a largo plazo que Molino puede aportar al sistema nacional Interconectado.

- ✓ Con la inclusión de la central Mazar y la optimización del recurso hídrico en los embalses del complejo se observa una disminución considerable de los volúmenes de vertimiento que antes presentaba el embalse Amaluza debido que en algunos años atrás estos volúmenes de evacuación eran desmedidos.
- ✓ Es necesario incrementar el nivel de riesgo en la operación de los embalses en el periodo lluvioso, esperando con un nivel bajo de los embalses las crecidas que se puedan presentar en ese periodo, claro está que el riesgo al inicio de la temporada seca se incrementa si no se cumple el objetivo de mantener los embalses con niveles altos en ese periodo.
- ✓ Los resultados de las simulaciones revelan que la base de los tiempos de mantenimiento de las unidades deben ser analizados para mejorar aún más la producción de energía del complejo, esta producción se verá incrementada si a más de los escenarios analizados se consideran modificaciones en los periodos de mantenimiento.
- ✓ Este trabajo da un aporte para la gestión de la operación de los recursos hídricos de la cuenca del Paute pues brinda al operador o administrador de los embalses de Mazar y Amaluza una herramienta de apoyo para encontrar soluciones optimas de operación del sistema.
- ✓ El factor fundamental para los análisis de este modelo u otros son la calidad de la información de entrada necesaria para la ejecución de dichos programas computacionales como tal es este caso, siendo el principal las estimaciones de los caudales promedio de ingreso de la cuenca, mismos que deben tener un grado alto de confiabilidad o certeza debido que si los mismos no representan de manera adecuada la serie hidrológica de la cuenca futura los resultados de cualquier algoritmo traerían consigo errores en sus interpretaciones.

- ✓ Las limitaciones en el algoritmo desarrollado podrían ser superadas cuando se disponga de la información carente (series hidrológicas consideradas por CENACE dentro del plan anual), información que podría mejorar los resultados brindados por el programa computacional.
- ✓ Es necesario recomendar que las investigaciones futuras de largo plazo del complejo hidroeléctrico Paute incluyan en sus modelos la inclusión de todas sus centrales, es decir, considerando a Sopladora y Cardenillo con sus particularidades y restricciones propias, cabe mencionar que el algoritmo de este proyecto al ser su código fuente abierto y tener una estructura de acuerdo a la ubicación física del complejo facilita complementar el alcance de trabajos futuros.
- ✓ Para futuros proyectos de investigación, se recomienda profundizar en la investigación sobre el modelo de caudales proyectados “futuros” en lo que respecta a los caudales laterales del embalse Amaluza debido a su variabilidad mostrada en sus registros históricos en los últimos años.
- ✓ Por la importancia que tiene el complejo hidroeléctrico Paute dentro sistema SNI es recomendable que este tipo de modelo sea perfeccionado y enfocado en el corto plazo considerando la inclusión de la central Sopladora y de ciertas características necesarias para su implementación en ese periodo de análisis, más aún que en un futuro muy cercano la central Sopladora ingresara en fase de funcionamiento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Hidropaute, Informe de aniversario del complejo hidroeléctrico Paute, Cuenca, 2007.
- [2] Hidropaute S.A., Licitación de los estudios para el aprovechamiento integral del sistema hidroeléctrico Paute y los diseños finales de la Central Sopladora, Términos de referencia, sección 4.
- [3] Hidropaute, Informe anual de operación 2007, Hidropaute S.A., 2008.
- [4] INECEL , Proyecto Hidroeléctrico Paute Fase “C”, tríptico informativo, 1990
- [5] Hidropaute CELEC S.A, Informe del Proyecto Hidroeléctrico Paute Sopladora, 2009.
- [6] Hidropaute, CELEC S.A., Informe de Gestión 2009, Cuenca, 2010.
- [7] INECEL, Hidropaute, Estudios de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Sopladora, volumen 1 y anexo 6, apéndice 6.7, mayo 1992.
- [8] Universidad del Azuay, IERSE, Información temática digital de la cuenca del río Paute, <http://www.uazuay.edu.ec/promsa/Paute/home.htm>
- [9] Restrepo Pedro, Estimación de la generación en el sistema Mazar – Molino, CONAM, Mayo 2001
- [10] Hidropaute, Informe de Gestión 2010, Unidad de Negocio Hidropaute CELEC E.P., Cuenca, 2011.
- [11] Silva M. Gustavo, “Hidrología Estocástica”, Bogotá, Enero 2003.
- [12] Paz V, Salinas S, “Optimización de la Producción hidroeléctrica de la empresa Elecaastro S.A.”, Tesis de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Junio 2005.
- [13] Correa J. Angel, Análisis de caudales en los sitios de presa Mazar-Ingapata y Amaluza del Proyecto Hidroeléctrico Paute, enero 2001.
- [14] Palacios G. Eugenio, “Modelo para Manejo de la Incertidumbre Hidrológica en la Planificación de la Operación del SIC”, Universidad de Chile, Octubre 2004.
- [15] Moreno C. Julián, Salazar José, “Modelo autoregresivo multivariado basado en regímenes para la generación de series hidrológicas” Dyna, Vol. 76, Núm. 157, pp. 101-108, Universidad Nacional de Colombia, marzo, 2009
- [16] Hidropaute, Informe anual de operación 2010, Unidad de Negocio Hidropaute CELEC E.P., Cuenca, 2011.

- [17] Valencia Restrepo Dario, "Algunos comentarios sobre las series Hidrológicas", Revista Colombiana de Estadística, Nº 23-24, 1991.
- [18] Brown, E., Vargas X., Salas J., "Selección de Modelos Arima Para Series de Tiempo Hidrológicas", Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, 1983.
- [19] Zarate Mejia Obed, Planeación de la Operación a Mediano Plazo de un Sistema Hidrotérmico Mediante Programación Lineal, Tesis de Maestro en Ciencias, Mexico, 2006.
- [20] Cortes G. José, Hernández C. Manuel, Najera H. Adrián, Planeación de la Operación de un Sistema Hidroeléctrico, México, 2008.
- [21] Camac D., "Programación Dinámica Dual Determinística en el Despacho Hidrotérmico", Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1994.
- [22] Pereira M, "Optimal Scheduling of Hydrothermal Systems An Overview" Proceedings of the IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Río de Janeiro, Brasil, July 1985.
- [23] Gil S. Esteban Manuel, Programación de la Generación de Corto Plazo en Sistemas Hidrotérmicos Usando Algoritmos Genéticos., Tesis Magister Universidad Técnica Federico Santa Maria, Valparaíso, 2001.
- [24] Torres A. Rigoberto, "Modelo de coordinación hidrotérmica multimodal y multiembalse para sistemas eléctricos longitudinales en el mediano plazo", Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile, 2006.
- [25] Pereira M, Campodónico N, Kelman R, "Long-term Hydro Scheduling based on Stochastic Models" Power Systems Research Inc., PSRI Rio de Janeiro, Brazil, EPSOM'98, Zurich, September 23-25, 1998.
- [26] Sifuentes Rosales Wilfredo, Despacho Económico Activo – Reactivo de Corto Plazo Multiembalse Multimodal. Aplicación de Técnicas de Descomposición, Tesis de Doctoral Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2006.
- [27] R. Chaer, P. Monzón "Condiciones de estabilidad de la optimización dinámica estocástica aplicada al cálculo del valor del agua de un embalse", IEEE 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas, pp. 64-68, Montevideo, Octubre 2008.
- [28] Bedoya Juan, Barrera Mauricio, "Programación Dinámica Estocástica Aplicada al Problema del Despacho Hidrotérmico", Scientia Et Technica, Vol. XI Nº 28, pp. 53-58, Octubre 2005.
- [29] CONELEC, Regulación No. CONELEC – 006/00. Procedimientos de Despacho y Operación V2.0 , <http://www.conelec.gob.ec/>

- [30] Smith Ricardo, Amisial Roger, "Operación de Embalses Mediante el Uso de Programación Dinámica", CIDIAT (Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras), Mérida –Junio 1983.
- [31] Labadie John W., "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 130, N° 2, pp. 93-111, March/April 2004.
- [32] W.Willian, G.Yeh., "Reservoir Management and Operations models: A State of the Art Review", Water Resources Research, Vol 21, No 12., December 1985.
- [33] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control. John Wiley and Sons, New York, 1984.
- [34] Catalão, J., S. Mariano, V. Mendes y L. Ferreira, "Short-Term Hydro Scheduling: A Comparison of Linear with Non-Linear Network Mathematical Programming", 3rd IASTED International Conference on Power and Energy Systems, 441-445, Marbella, España, Sept. 3-5 (2003).
- [35] Hinçal Onur, Optimization of Multireservoir System by Genetic Algorithm, Thesis Doctor, Middle East Technical University, 2008.
- [36] Garcés R. Alejandro, Galvis Juan, Gomez C. "Algoritmo Evolutivo Diferencial Aplicado al Problema de Despacho Hidrotérmico" Scientia et Technica Año XII, No 32, Diciembre de 2006.
- [37] Kwang Y. Lee and Mohamed A. El-Sharkawi, Modern Heuristic Optimization Techniques, Theory and Applications to Power Systems, IEEE Press, John Wiley & sons, 2008.
- [38] Guerequeta Rosa, Vallecillo Antonio, Técnicas de Diseño de Algoritmos, Universidad de Malaga, Manuales, 1998
- [39] Frederick S. Hiller, Gerald J. Lieberman, Investigación de operaciones, 6ta Ed., McGraw-Hill, 2002.
- [40] Wayne L. Winston, Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos, 4ta Ed., Thomson, 2005.
- [41] Bellman, R., Dynamic programming, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
- [42] Rust John, Dynamic Programming entry for consideration by the New Palgrave Dictionary of Economics, Department of Economics, University of Maryland, April 2006
- [43] Salas J.D., Shen H.W. and Obeysekera J., Estudios sobre la operación y seguridad del sistema de embalses Valdesia, vol 5, IDHRHI, CSU University Colorado State, publicaciones IICA, 1986.

- [44] Labadie J.W, "Estudios sobre la operación y seguridad del sistema de embalses Valdesia" (Optimización de la operación de proyectos Hidroagricolas), IDHRHI, CSU University Colorado State, publicaciones IICA, 1986.
- [45] K.D.W. Nandalal and Janos J. Bogardi, Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs, Aplicability and Limits. Cambridge, New York, 2007.
- [46] Long Le Ngo, "Optimising reservoir operation" A case study of the Hoa Binh reservoir , Vietnam, Institute of Environment & Resources Technical University of Denmark, Ph. D. thesis, 2006.
- [47] García J, Moraga R, Nogales S, Saiz A, Gestión óptima de los embalses en el medio-largo plazo bajo la perspectiva de una empresa generadora en el mercado eléctrico, anales de mecánica y electricidad, pp 18-26, 2005.
- [48] Guevara M.E., Estructuras Hidráulicas. Embalses, pp 1-31, 2000.
- [49] Chaer Ruben, Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica, Tesis de Magister en Ingeniería Eléctrica, Montevideo, 2008.
- [50] UNESCO, Water resources systems planning and management, ISBN 92-3-103998-9, año 2005
- [51] Asim Rauf Khan, A Two-State Deterministic Programming Model For Optimising the Joint Operation of Mangla an Tarbela reservoirs in Pakistan, Thesis the degree Master of applied science, The University British Columbia, 1996.
- [52] García B. Alba Nélida, Metodología para la Generación y Evaluación de Políticas de Operación en Sistemas de Recursos Hídricos. Aplicación a un Sistema de México., Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, España, 2007.
- [53] Arce Encina A.S., Alvarez Ferreira L.R., Barrientos L.G., "Un estudio del regimen de operación de las usinas hidroeléctricas paraguayas de Iguazu y Acaray", XIII ERIAC Décimo tercer encuentro regional iberoamericano, CIGRE, XIII/PI-C2-31, Mayo 2009.
- [54] Chung Chang, Hung Chen, Kong Fong P. Lu y R. Li, "Hydroelectric Generation Scheduling with an Effective Differential Dynamic Programming Algorithm, IEEE Transactions on Power Systems, 5(3), 737-742(1990).
- [55] Ni, E., X. Guan y R. Li, "Scheduling Hydrothermal Power Systems with Cascaded and Head-Dependent Reservoirs", IEEE Transactions on Power Systems, 14(3), 1127-1132(1999).



- [56] Bensalem, Miloudi, Zouzou, Mahdad, Bouhental, "Optimal Short-Term Hydro Scheduling Of Large Power Systems with Discretized Horizon", Journal of Electrical Engineering, Vol. 58, Nº 4, pp 214-219, 2007.
- [57] Catalão, J., S. Mariano, V. Mendes y L. Ferreira, "Scheduling of Head-Sensitive Cascaded Hydro Systems: A Nolinear Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24 Nº 1, pp. 337-345, Febrero 2009.
- [58] Mendes V., L. Ferreira y S. Mariano, "Short-Term Hydro Schedule with Head-Dependent Approach by a Nonlinear Model", 8th Portuguese-Spanish Congress on Electrical Engineering, 257-263, Vilamoura, Portugal, Jul. 3-5 (2003).
- [59] García González Javier, Optimización de la explotación en el corto plazo y elaboración de ofertas en un sistema eléctrico liberalizado, Tesis Doctoral Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2001.
- [60] Gómez Martinez Jonathan, Modelación de Competencia en Sistemas Hidrotérmicos Aplicando Teoría de Juegos, Tesis de Maestro en Ciencias, Mexico, 2007.
- [61] Javier García de Jalón, José Ignacio Rodríguez, Jesús Vidal, Aprende Matlab 7.0 como si estuviera en primero, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2005
- [62] Víctor Domínguez Báguena Maria Luisa Rapún Banzo, Matlab en cinco lecciones de Numérico, Universidad pública de Navarra, 2006
- [63] Diego Barragán Guerrero, Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab Parte I, 2008, <http://www.matpic.com/>
- [64] R. W. Ferrero, J.F. Rivera, S.M. Shahidehpour "A Dynamic programming Two-Stage Algorithm for Long-Term Hydrothermal Scheduling of Multireservoir Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13 Nº 4, pp. 1534-1540, November 1998.
- [65] Bonitz Christoph, An Incremental Dynamic Programming Approach Multidimensional Allocation Problems, Vienna University of Technology, Vienna, May, 2008.
- [66] CENACE, Informe del proyecto embalse equivalente, Quito, 2010
- [67] INECEL-Hidropaute, Informe anual de operación 1999, Hidropaute S.A., 1999.
- [68] Hidropaute, Informe anual de operación 2000, Hidropaute S.A., 2000.

- [69] CENACE, Informe del Plan de operación del sistema nacional interconectado octubre 2011 – septiembre 2012, 2011
- [70] CENACE, Informe del Plan de operación del sistema nacional interconectado enero 2012 – diciembre 2012, 2012
- [71] Jay R. Lund, Joel Guzman, “Some Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel”, Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 125, No 3-pp 143-153, June,1999.
- [72] Olivares M. Alberto, Optimal Hydropower Reservoir Operation with Environmental Requirements, Ph.D. thesis, university of California Davis, California, 2008
- [73] Jay R. Lund, “Developing Seasonal and Long-term Reservoirs System Operation Plans using HEC-PRM”, Hydrologic Engineering Center U.S. Army Corps of Engineers, research document 40, pp 1-125, June ,1996.

# ANEXOS

## ANEXO A Características de la presa y central Mazar

Tabla A. 1 Características de la presa Mazar

Presa Mazar	
<b>Tipo</b>	(CFRD) Enrocado con cara de hormigón
Cota de coronación (con parapeto)	2 166m
Longitud coronación	340 m
Altura máxima (con parapeto)	166 m desde la cimentación
Cota Lecho (proyecto)	1 990m
Ancho Base (presa)	500m
Inclinación Taludes	1V: 1,4H
<b>Vertedero</b>	
Caudal de diseño	8 550 m <sup>3</sup> /s
Número de vertederos	2 vertederos independientes libres
<b>Desagüe de Fondo</b>	
Tipo	Túnel con cámara de compuertas
Sección baúl (B x H)	6,3 m x 6,15 m
Longitud total	376 m
Capacidad máxima de descarga	450 m <sup>3</sup> /s con nivel máximo
Cota solera	2060 m.s.n.m.
<b>Túnel de Carga</b>	
Obra de toma	Abocinada elípticamente
Cota solera en la toma	2 083 msnm
Cota máxima de operación	2 153 msnm
Cota mínima de operación	2 098 msnm
Longitud	433 m
Caudal de diseño	141,1 m <sup>3</sup> /s
Revestimiento	Hormigón armado

Tabla A. 2 Características de la central Mazar

Sistema de la central	
<b>Casa de máquinas</b>	
Tipo	Subterránea
Elevación del eje de las turbinas	1 994,50 msnm
Elevación del piso principal	2 006,60 msnm
<b>Túnel de descarga</b>	
Revestimiento	Hormigón
Longitud total	732 m
<b>Turbinas</b>	
Número	2
Tipo	Francis, eje vertical
Caudal máx./unid.	70,55 m <sup>3</sup> /s
Capacidad por unidad	81,63 MW
Velocidad	257,14 rpm
Potencia máx.	91,83 MW
Caudal nominal/unid.	67 m <sup>3</sup> /s

## ANEXO B Características de la presa Amaluza y central Molino

Tabla B. 3 Características de la presa Amaluza

<b>Presa Daniel Palacios</b>	
Tipo	Arco gravedad
Altura máxima	170 m
Longitud de coronación	420 m
<b>Vertedero</b>	
Caudal de diseño	7 724 m <sup>3</sup> /s
Número de compuertas	6 u
<b>Desagüe de Fondo</b>	
Tipo válvula de compuerta y disipadora de cono hueco	
Número de válvulas	2
Caudal máximo total	250 m <sup>3</sup> /s
<b>Compuerta de toma I (servicio)</b>	
Tipo	Ruedas fijas
Altura	6,15 m
Ancho	3,60
<b>Compuerta de mantenimiento</b>	
Tipo	Deslizante
Altura	6,83 m
Ancho	3,64 m

Tabla B. 4 Características de la central Molino

SISTEMA	FASE AB	FASE C
<b>Casa de máquinas</b>		
Longitud túnel de acceso		198 m
Ancho		23,4 m
Alto		42,5 m
Longitud	105,5 m	78,5 m
<b>Túnel de descarga</b>		
Longitud total		130 m
Pendiente		3 %
Número de unidades	5	5
Descarga máxima	100 m <sup>3</sup> /seg	105 m <sup>3</sup> /seg
<b>Turbinas</b>		
Tipo		Pélton eje vertical
Elevación rodete de turbinas		1323 msnm
Número de inyectores		6
Rendimiento		91,83 %
Rotación		Sentido horario visto desde nivel superior
Número de alabes del rodete		22
Caída neta de cálculo	667 m	657 m
Potencia, caída neta	120400 KW	122000 KW
Número de unidades	5	5

## ANEXO C

## Producción Mensual Histórica de la central Molino

Tabla C.5 Producción mensual histórica de la central Molino

PRODUCCIÓN BRUTA MENSUAL HISTÓRICA (MWh)													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado
1983	-	-	-	-	-	-	-	23461	28987	173057	221441	274157	721103
1984	183599	184698	185627	185114	192404	173691	171685	190951	202200	153906	212468	209719	2246062
1985	213156	197891	206165	163272	178899	169374	158850	209564	206768	228101	228574	235636	2396250
1986	206283	204854	225251	244046	258929	262247	275064	283794	278460	282173	273032	284977	3079110
1987	288614	288625	271192	283179	291250	293815	288200	292101	289361	295941	234916	223851	3321045
1988	237122	241635	262946	206400	227887	231572	221461	243325	244921	242890	212718	248209	2821086
1989	228963	234406	221236	229895	227498	214000	242419	260151	280172	244011	273769	227446	2883966
1990	159927	245605	276045	243627	271869	273654	283669	285263	290234	274808	261384	288142	3154227
1991	241349	161268	297434	294801	286963	297316	281759	280191	294236	298999	269875	231774	3235965
1992	168561	99225	274228	318564	363575	394869	403381	387274	309319	236553	174834	164902	3295285
1993	227597	260439	376049	328611	228278	368589	386371	401591	375407	334177	335925	287675	3910709
1994	338485	294139	396951	404859	413300	412620	414074	359332	365992	372614	370754	382131	4525251
1995	270068	199471	219851	267952	362992	459718	514436	228758	196117	184738	344208	257595	3505904
1996	279676	290942	385458	367417	451391	428645	463908	455467	411249	349820	269202	178464	4331639
1997	140767	285321	473388	400274	526964	332486	516878	449533	403959	235338	358441	409735	4533084
1998	293837	301800	375700	499085	466423	487005	538640	423032	280900	255321	321783	151628	4395154
1999	229977	363815	466503	474873	481015	405243	474854	482818	308496	410447	204669	398327	4701037
2000	198784	292157	558625	517644	535315	529696	515534	466276	450845	434326	141940	224284	4865426
2001	256540	235796	275740	408801	471920	482426	548461	526584	395186	215065	160106	237016	4213641
2002	217347	192851	220913	421783	564625	433853	585829	571057	259652	326246	452560	310999	4557715
2003	214517	227265	265771	408698	675655	495955	630736	445935	328641	297272	230782	375211	4596438
2004	228744	121070	394073	318303	504128	680970	572022	523097	448336	357708	282512	352706	4783669
2005	183582	349626	527408	618268	502430	614031	504925	312913	243034	176635	291682	283210	4607744
2006	309445	350953	426854	489384	492196	495338	454045	346184	336526	275387	234496	369069	4579877
2007	302206	189034	374583	601656	554351	595851	401604	436396	411717	381440	468071	358203	5075112
2008	356851	490255	525686	564838	617867	590488	710441	529409	550874	520009	495530	333600	6285848
2009	448541	397261	347085	486533	551282	541541	612355	467704	316766	312755	143222	171267	4796312
2010	192431	289714	222838	298258	459583	498277	564526	506641	251814	206734	228684	336780	4056278

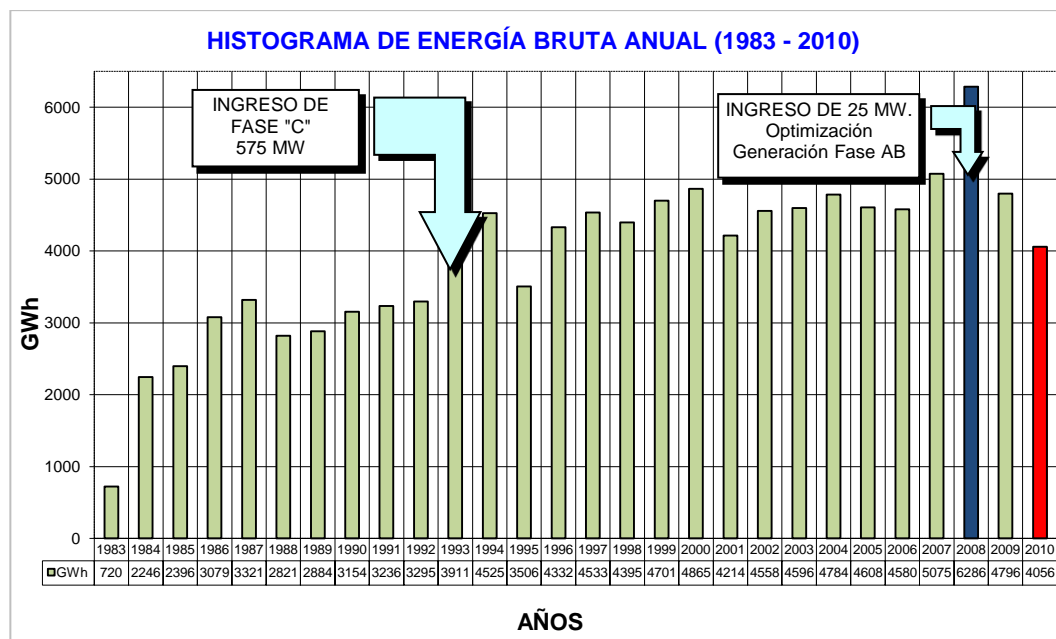


Figura C. 80 Producción de energía anual de la central Paute molino<sup>22</sup>.

Tabla C. 6 Producción de energía máxima, promedio, mínima de la central Molino [GWh]

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MÁXIMO	448.5	490.3	558.6	618.3	675.7	681.0	710.4	571.1	550.9	520.0	495.5	409.7
MEDIA	260.5	285.1	379.6	437.6	492.2	491.8	522.8	440.7	352.0	313.7	296.4	301.0
MÍNIMO	140.8	121.1	219.9	268.0	228.3	332.5	386.4	228.8	196.1	176.6	141.9	151.6

Tabla C. 7 Parámetros estadísticos de producción de energía de la central Molino

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	260.5	285.1	379.6	437.6	492.2	491.8	522.8	440.7	352.0	313.7	296.4	301.0
DESV-STD	73.6	86.8	107.0	101.8	97.6	90.1	84.0	85.9	89.0	92.7	107.2	81.5
C. VAR	3.5	3.3	3.5	4.3	5.0	5.5	6.2	5.1	4.0	3.4	2.8	3.7
RANGO	307.8	369.2	338.8	350.3	447.4	348.5	324.1	342.3	354.8	343.4	353.6	258.1

<sup>22</sup> Fuente: informe anual del año 2010 [16]

## ANEXO D Producción Mensual Histórica de la central Mazar

Tabla D.8 Producción mensual histórica de la central Mazar

PRODUCCIÓN BRUTA MENSUAL HISTÓRICA (GWh)													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado
2010	-	-	-	-	3.1	1.4	43.4	55.5	30.7	33.9	34.8	59.9	262.7
2011	66.9	63.6	52.3	55.6	94.1	103.5	99.1	72.7	84.5	65.7	50.7	99.7	908.4

## ANEXO E Caudales Afluentes medios mensuales Embalse Amaluza

Tabla E. 9 Caudales afluentes medios mensuales a la zona del Embalse Amaluza

CAUDALES AFLUENTES MEDIOS MENSUALES - EMBALSE AMALUZA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1964	81.0	66.2	82.1	154.8	200.4	250.5	139.3	177.9	221.4	84.5	66.5	42.6
1965	48.0	45.9	60.5	102.6	175.6	243.6	183.2	125.9	134.3	100.8	140.4	62.0
1966	118.7	83.3	109.5	107.3	82.4	92.6	123.0	127.5	89.2	82.1	44.4	46.1
1967	88.8	72.3	61.4	91.6	170.8	172.7	241.6	198.2	102.9	114.1	65.5	55.1
1968	80.1	30.6	95.3	100.3	61.6	101.1	238.2	139.1	106.5	119.5	55.7	25.8
1969	36.9	73.3	66.7	188.8	103.7	141.2	147.6	159.0	122.4	65.6	88.7	115.0
1970	108.7	190.7	145.9	164.4	172.0	299.4	161.9	214.4	161.9	107.6	103.0	103.6
1971	84.5	102.5	182.8	146.7	100.6	163.3	220.7	173.4	168.6	124.9	67.0	59.1
1972	117.6	95.5	106.0	134.8	149.3	178.3	264.0	116.7	155.6	93.8	104.9	87.5
1973	98.6	128.3	98.4	137.4	140.7	136.9	173.9	178.7	145.6	72.3	74.5	47.0
1974	49.8	128.3	90.2	70.2	181.9	122.7	273.1	137.5	185.6	179.0	110.8	104.1
1975	105.2	92.4	166.0	120.7	175.0	308.2	215.0	235.6	124.5	135.2	114.0	53.9
1976	74.0	61.8	72.9	202.1	247.7	278.8	343.0	238.9	119.2	59.0	77.9	60.6
1977	51.2	105.2	132.6	193.2	108.8	214.5	176.3	129.5	144.8	111.0	46.5	61.2
1978	49.1	71.2	137.9	229.6	198.1	287.1	214.9	196.4	140.2	181.9	51.3	42.4
1979	33.8	26.3	79.7	150.5	136.2	138.7	136.7	106.4	64.3	53.7	36.0	56.5
1980	45.0	62.1	79.2	148.9	118.3	183.8	191.3	118.5	109.9	147.3	100.6	74.7
1981	34.1	58.0	126.5	127.1	74.6	134.2	151.7	65.7	79.5	46.1	31.4	51.9
1982	43.9	40.9	43.7	130.1	139.5	97.4	154.6	164.8	96.9	118.6	95.5	129.9
1983	103.3	120.6	132.4	185.4	167.9	101.8	113.0	123.1	110.4	142.9	58.2	78.5
1984	47.6	158.4	127.7	258.9	108.4	188.3	201.8	138.1	96.3	88.4	59.3	82.7
1985	41.2	45.4	42.0	46.1	92.5	252.3	206.8	167.1	87.5	77.7	66.0	45.7
1986	46.8	52.8	62.9	134.7	136.7	144.8	245.7	92.4	144.8	112.7	114.5	79.8
1987	61.6	152.7	128.5	142.7	181.5	140.9	158.5	115.2	112.1	102.3	42.7	59.2
1988	54.9	110.3	64.8	192.8	183.4	98.5	177.2	95.5	68.5	128.3	129.0	58.1
1989	109.5	124.9	179.9	107.8	203.9	268.4	247.3	107.0	78.7	129.6	72.0	30.8
1990	62.8	64.1	135.8	130.3	138.5	253.0	163.3	154.0	82.4	97.2	84.1	73.5
1991	46.8	97.0	82.2	101.7	119.2	168.5	226.3	155.9	93.2	73.3	80.7	47.0
1992	34.1	39.3	104.0	109.7	81.1	169.8	144.2	91.5	84.1	57.8	47.8	43.9
1993	56.8	75.2	192.8	103.6	188.3	206.2	203.3	126.9	121.5	89.1	78.1	93.6
1994	71.3	87.2	114.3	186.3	263.9	315.0	252.7	255.4	208.6	97.3	134.4	102.6
1995	62.9	42.0	52.6	80.2	150.0	133.5	150.6	47.0	64.5	50.0	91.0	74.7
1996	54.8	134.9	114.5	125.6	185.9	123.0	241.9	138.9	108.3	93.7	48.1	52.0
1997	35.8	97.7	118.2	141.1	241.6	73.0	211.3	141.9	87.8	51.3	127.2	101.9
1998	71.5	83.3	97.7	152.9	129.8	187.0	248.8	108.1	56.5	79.5	79.0	34.1
1999	67.0	116.3	158.4	337.8	283.1	147.0	175.7	180.8	98.1	96.3	47.3	93.6
2000	45.0	91.2	135.9	189.1	277.0	176.1	143.3	124.6	123.5	93.9	40.2	52.0
2001	51.2	59.3	70.4	145.7	100.3	255.2	135.4	146.5	89.5	49.3	46.9	57.6
2002	50.0	48.0	53.1	105.8	156.9	122.4	196.9	125.6	69.4	71.8	119.8	72.5
2003	49.1	57.9	62.7	114.5	268.7	145.3	157.4	98.0	83.8	65.3	59.0	96.5
2004	47.1	33.0	94.9	82.1	121.0	295.0	147.0	128.7	112.5	87.3	73.6	77.2
2005	37.0	100.6	137.6	200.0	135.7	216.5	115.7	72.2	55.0	47.8	71.8	80.0
2006	70.8	94.3	95.3	131.2	133.7	125.2	113.4	86.8	84.0	57.1	64.1	85.1
2007	73.5	47.9	87.0	156.7	146.1	352.2	90.7	137.2	99.4	85.8	137.8	81.5
2008	85.7	177.0	142.0	156.6	201.0	164.2	216.0	132.9	147.4	124.1	135.5	75.7
2009	113.0	99.9	82.6	185.5	148.1	155.8	162.0	118.6	71.1	64.2	41.2	45.6
2010	40.7	78.4	50.8	70.7	105.0	124.0	139.0	114.5	56.1	50.7	55.8	79.7



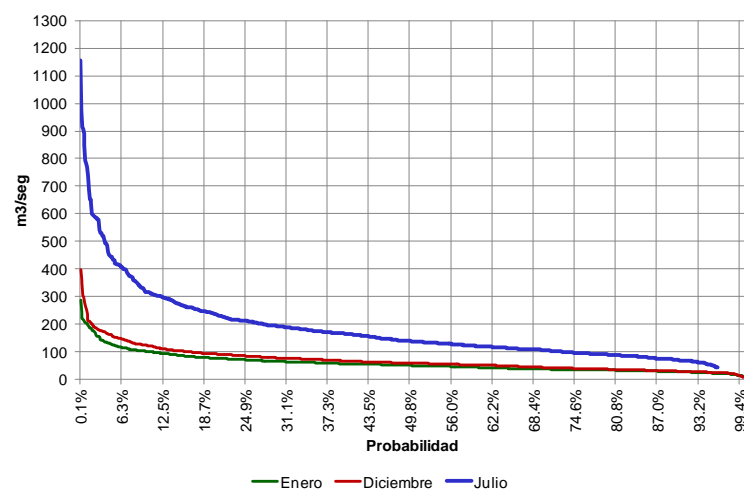


Figura E. 81 Curva de probabilidad del caudal de ingreso al embalse Amaluza [13]

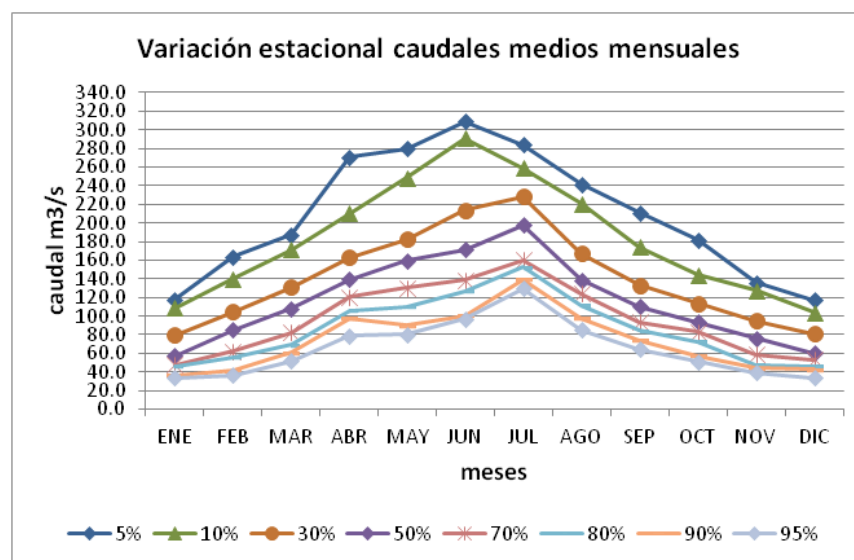


Figura E. 82 Curva de variación estacional caudales medios mensuales a la zona del embalse Amaluza [13]

**ANEXO F Caudales Afluentes medios mensuales Embalse Mazar**

Tabla F.10 Caudales afluentes medios mensuales del embalse Mazar

CAUDALES AFLUENTES MEDIOS MENSUALES EMBALSE MAZAR												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1964	50.9	38.7	50.2	103.5	139.0	181.1	99.0	131.6	167.2	58.2	41.8	20.7
1965	24.5	25.2	36.1	67.0	116.5	163.1	123.5	82.3	91.7	66.5	99.3	38.3
1966	81.9	49.7	60.4	81.2	55.4	63.9	81.7	82.8	56.5	51.2	25.0	26.8
1967	55.5	53.0	44.3	62.8	119.4	120.4	171.0	142.8	74.5	80.0	44.6	35.9
1968	56.4	23.0	72.5	71.4	44.4	66.9	167.3	102.5	74.2	82.4	41.1	19.4
1969	26.4	53.9	44.3	139.8	68.3	97.0	104.0	109.6	85.0	42.7	65.0	83.3
1970	73.5	148.4	94.5	106.7	135.4	216.9	113.8	149.1	110.9	69.5	65.9	66.1
1971	53.0	69.6	117.7	98.7	61.7	97.3	168.5	99.3	104.0	81.3	41.2	35.7
1972	79.5	61.4	77.3	88.2	90.2	103.0	168.1	72.2	105.0	69.1	79.2	58.4
1973	69.0	92.5	67.4	99.5	92.8	88.6	116.2	121.9	98.1	45.6	37.7	26.7
1974	28.9	75.7	63.8	50.7	111.6	78.0	170.0	96.5	110.0	144.4	89.2	82.0
1975	81.8	76.7	116.0	94.0	126.9	223.1	156.9	180.3	90.6	104.8	86.2	44.4
1976	59.0	53.6	64.2	149.4	174.6	194.2	253.0	158.0	80.1	41.4	48.7	42.3
1977	36.7	73.1	87.2	129.2	62.8	133.5	96.9	66.2	85.0	70.4	31.8	39.3
1978	19.5	32.4	88.6	133.6	93.8	189.1	139.6	133.0	83.6	132.8	34.8	31.9
1979	22.3	17.2	53.6	106.8	97.6	87.6	78.6	68.4	44.6	38.7	23.7	40.1
1980	27.9	41.4	51.7	121.7	85.0	135.0	153.1	81.8	74.7	97.0	62.6	49.8
1981	23.5	50.7	104.5	99.0	54.4	94.7	111.6	48.7	51.4	39.1	28.7	42.4
1982	34.6	28.2	28.5	82.8	90.0	60.0	100.1	97.0	57.0	77.6	68.0	103.6
1983	81.6	78.9	88.8	120.5	116.2	65.1	76.8	86.2	67.9	89.1	39.7	53.8
1984	35.3	118.4	79.2	202.4	94.4	142.0	153.9	105.6	73.0	70.2	52.9	67.7
1985	39.1	39.0	37.0	42.2	68.2	181.8	154.3	112.1	62.6	54.9	47.9	34.8
1986	38.5	42.5	49.2	100.4	95.9	93.8	166.3	84.0	103.2	87.9	89.6	63.1
1987	42.7	99.4	88.5	97.1	121.9	101.1	111.7	78.5	78.0	65.3	30.8	43.2
1988	43.9	77.2	44.9	139.7	145.2	76.4	113.7	56.7	43.9	92.3	93.9	45.2
1989	82.3	97.7	140.2	78.4	139.7	189.3	176.9	77.2	57.1	90.7	52.3	24.6
1990	42.3	43.7	80.2	82.3	81.5	170.4	104.4	99.1	61.8	68.9	59.0	52.9
1991	34.9	75.2	69.7	81.9	81.9	117.5	161.0	99.5	68.0	51.6	57.9	33.6
1992	23.9	28.3	77.6	72.1	49.5	107.2	90.7	53.9	55.3	39.9	32.0	36.7
1993	37.6	50.5	135.6	71.6	146.5	144.6	144.5	87.8	83.9	60.6	52.6	64.4
1994	47.7	59.2	78.3	130.6	176.6	223.4	181.8	180.4	147.0	67.1	93.5	70.4
1995	41.7	26.6	34.3	54.1	101.4	92.5	105.2	30.2	42.8	32.5	61.4	50.2
1996	35.7	93.6	78.1	87.3	130.3	84.9	170.7	96.3	74.4	63.6	30.9	33.8
1997	22.2	67.3	81.4	98.0	170.4	48.9	148.9	98.6	59.5	33.4	88.0	69.8
1998	47.9	56.2	66.7	106.4	89.8	131.1	175.7	74.4	37.2	55.8	53.2	20.8
1999	42.0	80.2	109.7	239.8	201.1	99.8	122.4	126.4	65.3	63.9	29.3	63.8
2000	28.6	62.1	94.6	132.5	197.3	123.5	99.6	86.0	85.1	64.0	25.3	35.0
2001	41.7	48.4	57.3	118.8	81.7	208.0	110.3	119.4	73.0	40.2	38.3	46.9
2002	40.8	39.1	43.3	86.2	127.9	99.8	160.5	102.3	56.6	58.5	97.6	59.1
2003	40.0	47.2	51.1	93.3	219.0	118.4	128.2	79.9	68.3	53.2	48.1	78.7
2004	38.4	26.9	77.4	66.9	98.6	240.4	119.8	104.9	91.7	71.2	60.0	62.9
2005	30.2	82.0	112.1	163.0	110.6	176.5	94.3	58.9	44.8	39.0	58.5	65.2
2006	57.7	76.9	77.7	106.9	108.9	102.1	92.4	70.7	68.4	46.5	52.2	69.3
2007	59.9	39.0	70.9	127.7	119.1	287.0	73.9	111.8	81.0	69.9	112.3	66.4
2008	69.8	144.2	115.7	127.7	163.8	133.8	176.0	108.3	120.1	101.2	110.4	61.7
2009	92.1	81.5	67.3	149.9	120.7	127.0	129.4	96.7	58.0	52.3	33.9	27.9
2010	33.4	75.5	40.5	76.7	102.7	149.2	109.0	75.0	40.6	30.6	35.3	52.2

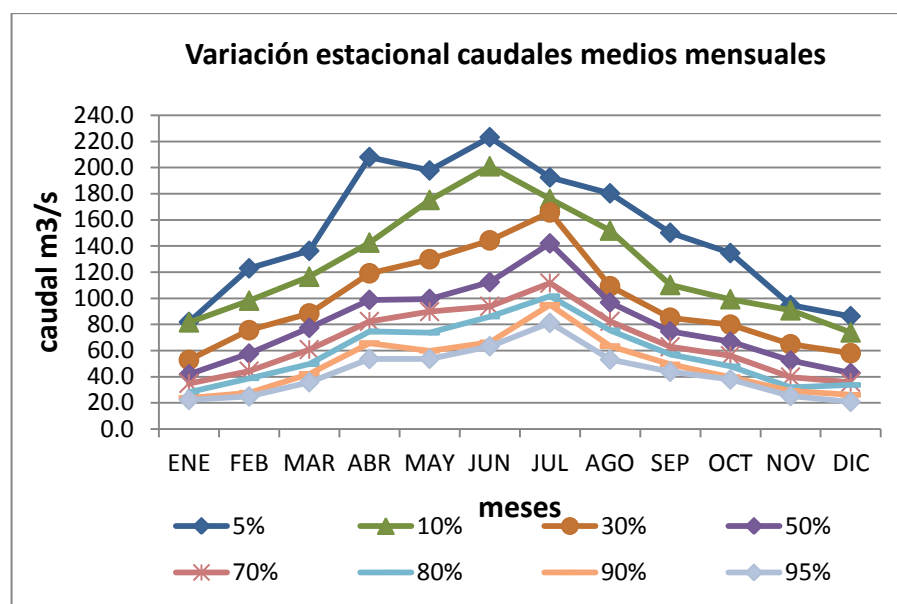


Figura F. 83 Curva de variación estacional caudales medios mensuales al embalse Mazar [13].

## ANEXO G Caudales Afluentes Laterales medios mensuales entrantes al sitio del Embalse Amaluza

Tabla G.11 Caudales afluentes laterales medios mensuales entrantes al sitio del embalse Amaluza

CAUDALES AFLUENTES LATERALES MEDIOS MENSUALES ENTRANTES AL EMBALSE AMALUZA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1964	30.1	27.5	31.9	51.3	61.4	69.4	40.3	46.3	54.2	26.3	24.7	21.9
1965	23.5	20.7	24.4	35.7	59.1	80.5	59.7	43.6	42.6	34.3	41.1	23.7
1966	36.8	33.6	49.1	26.1	27.0	28.8	41.3	44.7	32.7	30.9	19.4	19.3
1967	33.3	19.3	17.1	28.8	51.5	52.3	70.6	55.4	28.4	34.1	20.9	19.2
1968	23.7	7.6	22.8	28.9	17.2	34.3	70.9	36.6	32.3	37.1	14.6	6.4
1969	10.5	19.4	22.4	49.0	35.4	44.2	43.7	49.4	37.4	22.9	23.7	31.7
1970	35.3	42.3	51.4	57.7	36.6	82.5	48.1	65.3	51.0	38.1	37.1	37.5
1971	31.5	32.9	65.1	48.0	38.9	66.1	52.3	74.1	64.6	43.6	25.8	23.4
1972	38.1	34.1	28.7	46.6	59.2	75.3	95.9	44.5	50.6	24.7	25.7	29.1
1973	29.6	35.8	31.0	37.9	47.9	48.3	57.7	56.8	47.6	26.7	36.8	20.3
1974	20.9	52.6	26.4	19.5	70.3	44.8	103.1	41.0	75.7	34.6	21.6	22.1
1975	23.4	15.7	50.0	26.7	48.1	85.1	58.1	55.3	33.9	30.5	27.8	9.6
1976	15.0	8.2	8.7	52.8	73.1	84.6	90.0	80.9	39.1	17.6	29.2	18.3
1977	14.5	32.1	45.4	64.0	46.1	81.0	79.4	63.3	59.8	40.6	14.7	21.9
1978	29.6	38.8	49.3	96.0	104.3	98.0	75.4	63.5	56.6	49.1	16.6	10.5
1979	11.5	9.1	26.1	43.7	38.6	51.1	58.2	38.0	19.7	15.0	12.3	16.4
1980	17.1	20.7	27.6	27.2	33.3	48.8	38.2	36.7	35.2	50.3	38.0	24.9
1981	10.6	7.3	22.0	28.2	20.2	39.5	40.2	17.0	28.1	7.0	2.7	9.6
1982	9.3	12.7	15.2	47.4	49.6	37.4	54.5	67.8	39.9	41.0	27.5	26.4
1983	21.8	41.7	43.6	65.0	51.7	36.7	36.2	36.9	42.5	53.8	18.5	24.7
1984	12.3	40.1	48.5	56.5	14.0	46.3	47.9	32.5	23.3	18.2	6.4	15.0
1985	2.1	6.4	5.0	4.0	24.3	70.5	52.5	55.0	24.9	22.8	18.2	10.9
1986	8.3	10.3	13.7	34.3	40.8	51.0	79.4	8.4	41.6	24.8	24.9	16.7
1987	18.9	53.3	40.0	45.6	59.6	39.8	46.8	36.7	34.1	37.0	11.9	16.0
1988	11.1	33.1	19.9	53.1	38.2	22.1	63.5	38.8	24.6	36.0	35.1	12.9
1989	27.2	27.2	39.7	29.5	64.2	79.1	70.4	29.8	21.6	38.9	19.7	6.3
1990	20.5	20.5	55.6	48.1	57.0	82.6	58.9	54.9	20.6	28.3	25.1	20.6
1991	11.9	21.8	12.5	19.8	37.3	51.0	65.3	56.4	25.2	21.7	22.8	13.4
1992	10.2	11.0	26.4	37.6	31.7	62.6	53.6	37.6	28.8	17.9	15.8	7.2
1993	19.3	24.7	57.3	32.0	41.8	61.6	58.8	39.1	37.6	28.6	25.5	29.3
1994	23.6	28.1	36.0	55.7	87.3	91.6	70.9	75.0	61.6	30.2	40.9	32.2
1995	21.2	15.4	18.3	26.1	48.6	41.0	45.4	16.8	21.7	17.5	29.6	24.5
1996	19.1	41.4	36.4	38.3	55.6	38.1	71.3	42.6	33.9	30.1	17.2	18.2
1997	13.6	30.5	36.8	43.1	71.2	24.1	62.4	43.3	28.3	17.9	39.2	32.1
1998	23.6	27.1	31.0	46.5	40.0	55.9	73.1	33.7	19.3	23.7	25.8	13.3
1999	25.1	36.1	48.7	98.0	82.0	47.2	53.3	54.4	32.8	32.4	18.0	29.8
2000	16.4	29.1	41.3	56.6	79.8	52.6	43.7	38.6	38.4	29.9	14.9	17.0
2001	9.5	11.0	13.0	27.0	18.5	47.2	25.0	27.1	16.6	9.1	8.7	10.7
2002	9.3	8.9	9.8	19.6	29.0	22.7	36.4	23.2	12.8	13.3	22.2	13.4
2003	9.1	10.7	11.6	21.2	49.7	26.9	29.1	18.1	15.5	12.1	10.9	17.9
2004	8.7	6.1	17.6	15.2	22.4	54.6	27.2	23.8	20.8	16.2	13.6	14.3
2005	6.8	18.6	25.5	37.0	25.1	40.1	21.4	13.4	10.2	8.8	13.3	14.8
2006	13.1	17.4	17.6	24.3	24.7	23.2	21.0	16.1	15.5	10.6	11.9	15.7
2007	13.6	8.9	16.1	29.0	27.0	65.2	16.8	25.4	18.4	15.9	25.5	15.1
2008	15.9	32.7	26.3	29.0	37.2	30.4	40.0	24.6	27.3	23.0	25.1	14.0
2009	20.9	18.5	15.3	35.7	27.4	28.8	32.6	21.9	13.2	11.9	7.3	17.7
2010	7.3	11.8	7.6	10.6	15.8	18.6	30.0	39.5	15.5	20.2	20.5	27.5

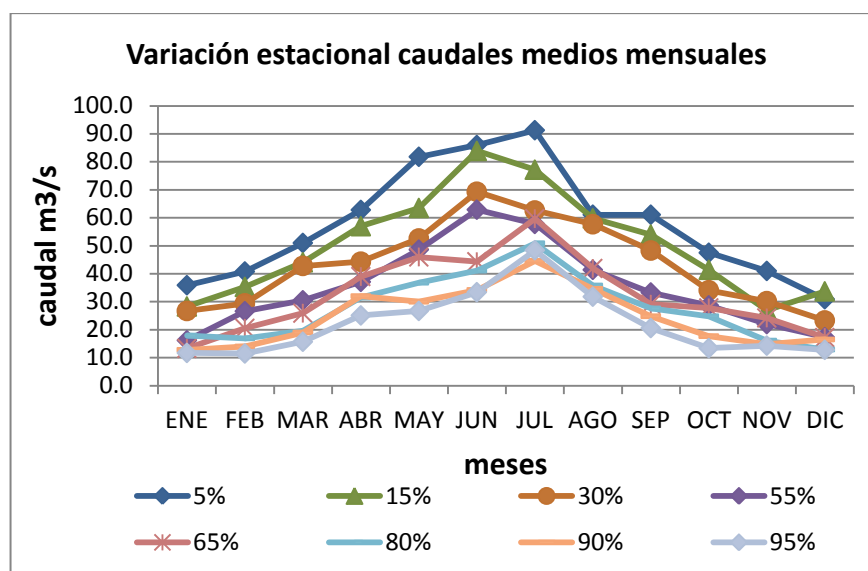


Figura G. 84 Curva de variación estacional caudales laterales entrantes medios mensuales al sitio del embalse Amaluza [13].

## ANEXO H Análisis estadístico de los caudales afluentes

En este anexo se muestran los resultados del análisis estadístico realizado a las series de caudales históricos para embalse Amaluza, sitio de presa Mazar así como también los afluentes laterales para el ingreso del embalse Amaluza.

Tabla H. 12 Parámetros estadísticos de los caudales afluentes medios mensuales del embalse Amaluza

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	64.7	85.6	103.4	144.2	157.2	184.0	185.9	138.9	110.0	92.8	78.3	68.8
DESV-STD	25.2	38.6	38.7	52.3	54.8	70.0	51.5	44.2	38.7	33.3	31.1	23.4
C. VAR	2.6	2.2	2.7	2.8	2.9	2.6	3.6	3.1	2.8	2.8	2.5	2.9
RANGO	84.9	164.4	150.8	291.7	221.5	279.2	252.3	208.4	166.4	135.8	109.0	104.1

La tabla H.12 indica que una mayor variación de caudales se presenta en el mes de julio y el mayor rango de la variación se establece en el mes de abril.

Tabla H. 13 Parámetros estadísticos de los caudales afluentes medios mensuales del sitio de presa Mazar

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	46.3	62.1	73.8	105.1	112.3	132.5	132.4	97.6	76.9	66.1	56.4	49.8
DESV-STD	19.2	29.4	27.1	37.5	40.9	54.4	37.0	31.6	26.5	24.5	24.6	18.9
C. VAR	2.4	2.1	2.7	2.8	2.7	2.4	3.6	3.1	2.9	2.7	2.3	2.6
RANGO	72.6	131.3	111.7	197.6	174.6	238.1	179.1	150.2	130.0	113.8	88.7	84.1

La tabla H.13 muestra que una mayor variación de caudales se presentan en el mes de julio y el mayor rango de la variación se establece en el mes de junio.

Tabla H. 14 Parámetros estadísticos de los caudales medios mensuales para los afluentes laterales del embalse Amaluza

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	18.4	23.7	29.5	39.4	45.1	52.4	53.4	41.4	33.1	26.7	21.9	19.0
DESV-STD	8.9	12.7	15.2	18.7	20.5	21.0	19.9	17.4	15.2	11.5	9.4	7.5
C. VAR	2.1	1.9	1.9	2.1	2.2	2.5	2.7	2.4	2.2	2.3	2.3	2.5
RANGO	36.0	47.2	60.1	94.1	90.4	79.4	86.3	72.5	65.5	46.8	38.4	31.3

La tabla H.14 indica que una mayor variación de caudales laterales al embalse Amaluza se presenta en el mes de julio y el mayor rango de la variación se establece en el mes de abril.

## ANEXO I Terminología de la Programación Dinámica

A continuación se realiza una explicación sobre las notaciones más comunes en la mayor parte de las aplicaciones de la programación dinámica [39], [40].

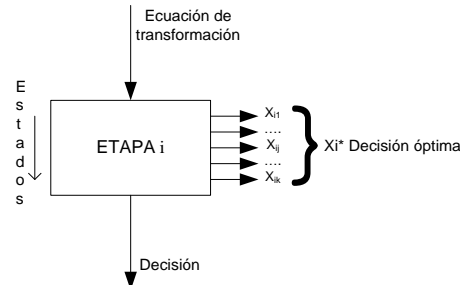


Figura I. 85 Etapa del problema de optimización

**Etapa.-** El problema se puede dividir en periodos o fases (etapas); Cada etapa es relacionada con una secuencia de decisión. En muchos problemas de programación dinámica, la etapa es la cantidad de tiempo que pasa desde el inicio del problema, en ciertos casos no se necesitan decisiones en cada etapa

**Estado.-** Cada etapa tiene un número de estados asociados con ella. Por estado se entiende la información que se necesita en cualquier etapa para tomar una decisión óptima.

**Decisión.-** La decisión (política) tomada en cualquier etapa indica cómo se transforma el estado en la etapa actual en el estado en la siguiente etapa. En muchos problemas, una decisión no determina con certeza el estado de la siguiente etapa; en lugar de ello, la decisión actual solo determina la distribución de probabilidad del estado en la etapa siguiente.

**Optimalidad.-** Dado el estado actual, la decisión óptima para cada una de las etapas restantes no debe depender de estados previamente alcanzados o de decisiones previamente tomadas. A esta idea se la conoce como principio de optimalidad indicado anteriormente.

**Función de Retorno.-** Si los estados del problema se han clasificado en uno de  $N$  etapas, debe haber una fórmula recursiva que relacione el costo o recompensa durante las etapas  $j, j+1, \dots, N$  con el costo o recompensa de las etapas  $j+1, j+2, \dots, N$ .

**Función Objetivo.-** Es la maximización de la suma de beneficios o la minimización de costos de las funciones de retorno de una secuencia de decisiones.

## ANEXO J Trayectorias iniciales de referencia de los embalses Mazar y Amaluza

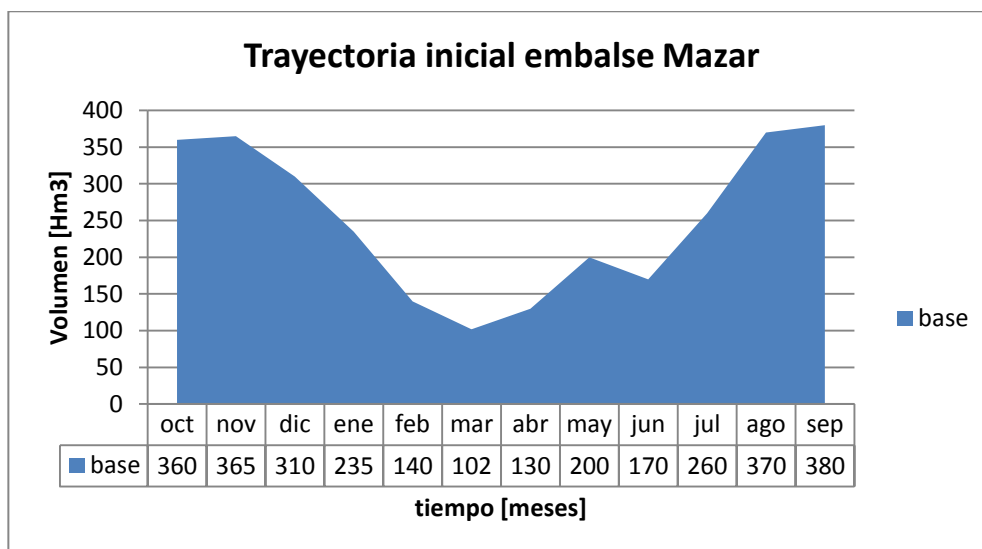


Figura J.86 Trayectoria inicial de referencia del embalse Mazar

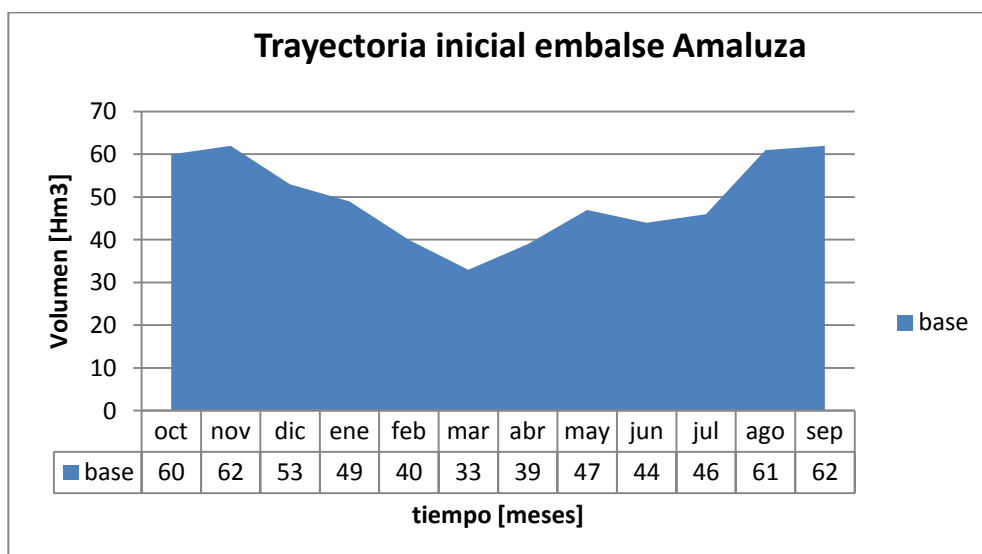


Figura J.87 Trayectoria inicial de referencia del embalse Amaluza



## ANEXO K Relación de la producción de energía con los volúmenes del embalse resolución con Programación Dinámica

Este anexo muestra un resumen de la resolución con programación dinámica incremental (Backward) para un embalse tratando de exponer la interrelación de la producción de energía con los volúmenes del embalse discretizados.

Tabla K. 15 Producción de energía de acuerdo a los puntos discretos calculada

PUNTOS	TABLA DE PRODUCCION DE ENERGIA											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	493.50	459.32	494.19	506.42	483.00	241.38	348.91	363.80	447.36	225.94	279.32	277.91
		321.45	167.96	445.40	562.30	270.81	211.20	517.89	423.56	138.10	128.09	271.83
		163.18	315.32	157.56	310.52	272.16	561.24	513.47	274.47	175.52	140.92	268.39
2		371.67	121.98	273.44	486.09	234.63	159.23	260.97	393.22	274.66	111.05	231.66
	407.39	130.04	158.70	234.64	233.26	505.46	210.01	498.50	226.34	127.28	226.37	222.68
		444.44	140.00	531.61	220.38	369.78	234.88	211.63	487.13	242.15	268.90	229.81
3		128.06	451.31	129.77	175.99	103.28	329.13	176.73	425.36	185.26	193.97	149.05
		154.08	586.84	284.05	412.86	361.55	260.69	287.09	485.07	215.71	122.06	214.97
	606.06	190.45	168.59	174.36	193.98	459.26	427.23	240.06	279.22	175.74	259.12	232.48

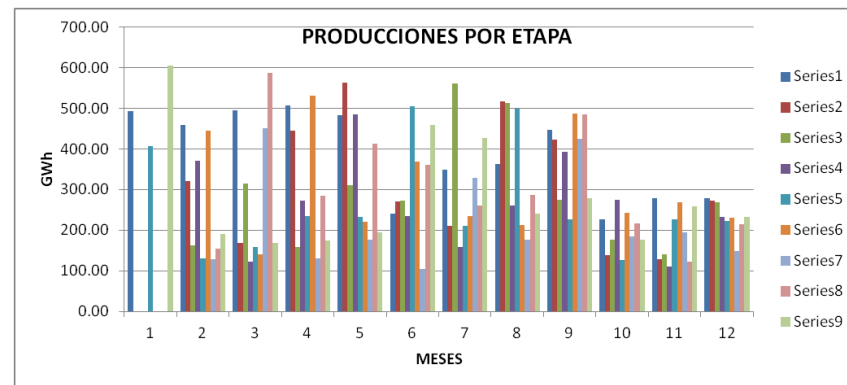


Figura K.88 Producción de energía por cada etapa de acuerdo a los puntos discretos

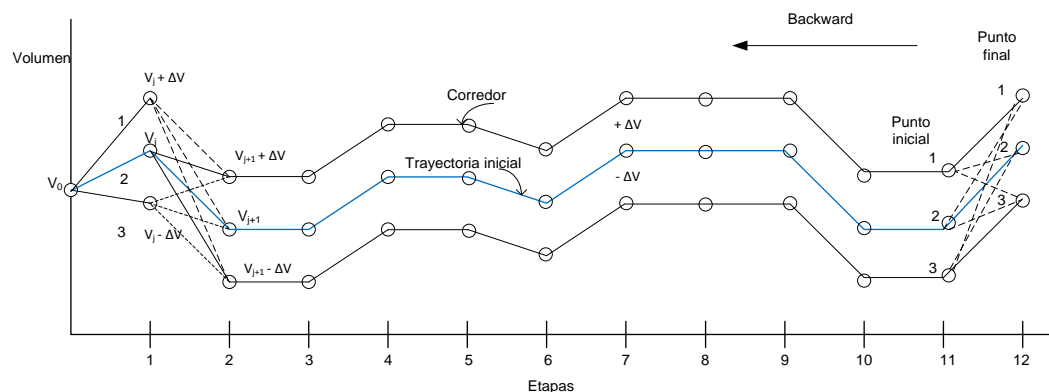


Figura K.89 Trayectoria inicial de referencia del embalse con su corredor

Con 3 valores discretos del volumen de embalse y dependiendo de las trayectorias entre etapas la producción de energía es mostrada en la tabla anterior.

De acuerdo al movimiento hacia atrás por cada etapa se va desarrollando el valor de energía de acuerdo la función recursiva del problema donde se va identificando los máximos valores por punto de discretización (valores subóptimos) hasta la etapa 1, donde se identifica el máximo valor de energía del periodo que en este caso es 5 045,07 GWh.

Tabla K. 16 Producción de energía acumulada y subóptimas por cada etapa

ENERGIA ACUMULADA											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5045.07	4551.56	4092.24	3598.06	2914.71	2420.72	2179.34	1619.25	1230.52	783.16	557.23	277.91
4505.08	4041.49	3641.76	3363.19	3091.63	2260.47	1939.31	1747.51	1255.45	639.48	359.76	271.83
4251.09	4223.82	3536.72	3099.75	2929.34	2431.71	2118.26	1830.42	1016.95	667.12	373.40	268.39
4551.56	4463.91	3720.04	3365.07	2917.80	2413.96	1989.66	1516.42	1176.39	831.89	388.96	231.66
4912.47	3850.08	3632.50	3152.44	2762.60	2495.12	1938.12	1728.11	1058.22	628.66	458.04	222.68
4251.09	4505.08	3361.40	3473.80	2839.20	2529.34	1791.90	1528.59	1229.61	733.76	501.38	229.81
4551.56	4220.31	4049.37	3221.41	2607.70	2282.62	2159.55	1432.18	1208.52	742.48	471.88	149.05
4505.08	3874.12	4060.64	3201.84	2942.20	2351.21	1988.80	1516.70	1316.96	717.08	353.72	214.97
4857.14	4251.09	3390.00	3116.56	2812.80	2618.82	1984.25	1557.02	1021.70	667.34	491.60	232.48
ENERGIAS SUBÓPTIMAS POR ETAPA											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5045.07	4551.56	4092.24	3598.06	3091.63	2431.71	2179.34	1830.42	1255.45	783.16	557.23	277.91
4912.47	4505.08	3720.04	3473.80	2917.80	2529.34	1989.66	1728.11	1229.61	831.89	501.38	231.66
4857.14	4251.09	4060.64	3221.41	2942.20	2618.82	2159.55	1557.02	1316.96	742.48	491.60	232.48

Luego de identificar el valor máximo óptimo en la primera etapa inversamente de la resolución se procede a reconocer los diferentes valores subóptimos de las diferentes etapas, identificando en la tabla acumulada dichos valores, al mismo tiempo se va identificando la producción de cada etapa y su posición en la tabla de producción inicial. Luego de esto se identifica de acuerdo a la posición a que puntos de discretización (inicial y final) corresponde dichos valores para obtener la trayectoria óptima del embalse.

Tabla K. 17 Producción de energía óptima y puntos de trayectoria óptimos

		ENERGIA OPTIMA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		5045.07	4551.56	4092.24	3598.06	3091.63	2431.71	2179.34	1830.42	1255.45	783.16	557.23	277.91
		4912.47	4505.08	3720.04	3473.80	2917.80	2529.34	1989.66	1728.11	1229.61	831.89	501.38	231.66
		4857.14	4251.09	4060.64	3221.41	2942.20	2618.82	2159.55	1557.02	1316.96	742.48	491.60	232.48
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VALORES OPTIMOS		493.50	459.32	494.19	506.42	562.30	369.78	329.13	513.47	485.07	274.66	279.32	277.91
POSICION TABLA		4	1	1	1	2	9	1	3	8	4	1	1
		TRAYECTORIA											
PUNTO INICIAL		1	1	1	1	1	2	3	1	3	2	1	1
PUNTO FINAL		1	1	1	1	2	3	1	3	2	1	1	1

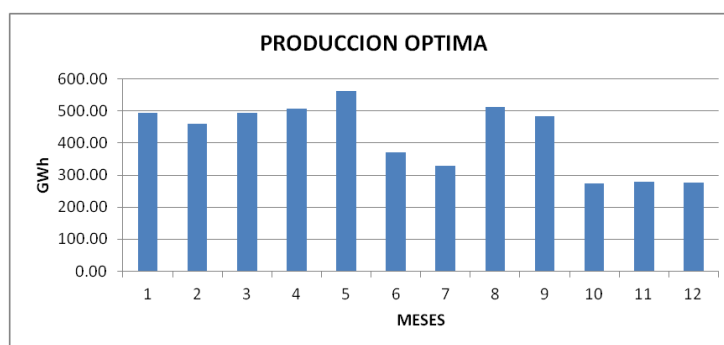


Figura K.90 Producción óptima calculada

La trayectoria óptima resultante de este ejercicio se muestra a continuación, esta trayectoria se identifica como factible físicamente por lo que se establece que la producción óptima de la resolución se interrelaciona con la trayectoria del embalse.

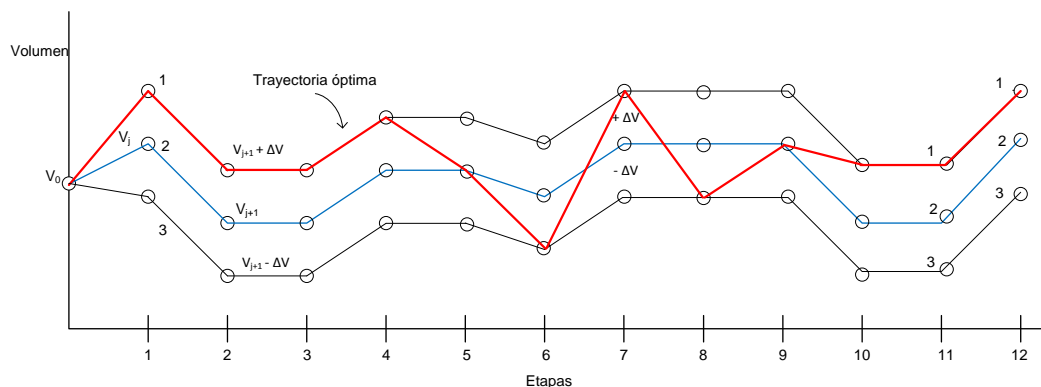


Figura K.91 Trayectoria óptima calculada

Cabe señalar que estas trayectorias subóptimas no son los valores máximos de producción de cada etapa, en el caso de que se quisiera asumir esto como valedero se produciría un error en la resolución ya que podría llevar a trayectorias no óptimas ni factibles; por ejemplo para demostrar lo indicado asumamos que los valores máximos de cada etapa de la tabla de energía son subóptimos totalizando una producción en el periodo de 5 649,74 GWh.

Tabla K. 18 Valores de energía máxima por cada etapa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ENERGIA MAXIMA	606.06	459.32	586.84	531.61	562.30	505.46	561.24	517.89	487.13	274.66	279.32	277.91
POSICION TABLA	9	1	8	6	2	5	3	2	6	4	1	1
	TRAYECTORIA											
PUNTO INICIAL	3	1	3	2	1	2	1	1	2	2	1	1
PUNTO FINAL	3	1	2	3	2	2	3	2	3	1	1	1

Este valor comparando con lo analizado inicialmente se presumiría que es mayor y correcto. Pero esta producción se debe de relacionar con una trayectoria del embalse para saber si es factible, por lo que, de la misma manera se va identificando la posición en la tabla de producción y los puntos de discretización, en la figura a continuación se grafica las trayectorias identificadas por etapa.

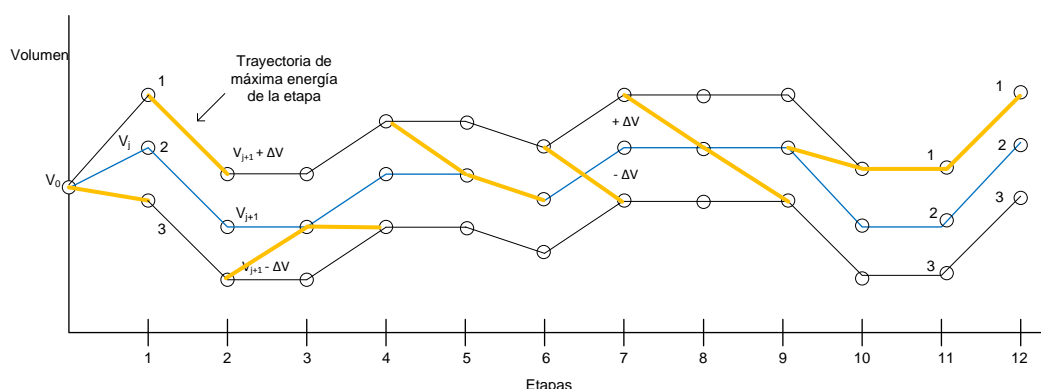


Figura K.92 Trayectorias debido a los valores máximos de generación por etapa

De la gráfica entonces se determina que no existe relación entre los valores de energía tomados como máximos por etapa con una trayectoria adecuada que sea real, es decir no existe trayectoria física del embalse para interrelacionar esa producción con el embalse, debido que para pasar de una etapa a otra existe incongruencias entre los valores de volumen (subóptimos) en varias etapas. Por lo tanto no es factible asumir la máxima producción por cada etapa para establecer una trayectoria óptima que esté relacionada.

## ANEXO L Prueba del modelo año hidrológico 2000 con la consideración operativa solo de la central Molino

### Datos iniciales:

Tabla L. 19 Nivel inicial del embalse Amaluza

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel final m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 983,28	1 983,5

Tabla L. 20 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Molino  
[Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MOLINO 1999-2000 [horas]												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
U1	211.62	0.40	10.00	0.00	9.5	3.63	66.83	5.23	13.17	0.00	8.75	24.80
U2	17.53	9.58	0.00	9.00	0	56.38	0.00	29.33	4.00	86.83	21.90	204.25
U3	100.95	130.13	0.00	11.50	0	9.13	54.83	24.08	7.75	0.00	19.00	5.42
U4	17.00	8.50	0.00	0.00	81.333	0.00	3.68	9.00	9.00	0.00	136.50	86.63
U5	17.17	229.85	4.00	4.00	13.75	45.55	9.57	0.00	123.48	3.67	9.00	5.15
U6	9.85	10.08	202.00	0.00	9.5	7.23	0.00	80.63	0.00	3.67	0.00	9.50
U7	9.08	24.52	4.00	176.18	5.367	14.83	10.05	19.22	9.47	59.50	13.83	0.00
U8	8.50	9.20	3.50	0.00	0	202.42	0.00	4.17	1.13	12.63	0.00	67.08
U9	0.00	26.35	2.50	232.50	10.483	10.50	0.00	3.67	0.00	64.50	0.00	9.50
U10	9.45	18.88	62.75	0.00	253.7	0.00	9.00	0.00	3.50	2.08	67.00	0.00

### Resultados de prodipa:

A continuación se presentan los resultados gráficos que brinda el algoritmo desarrollado

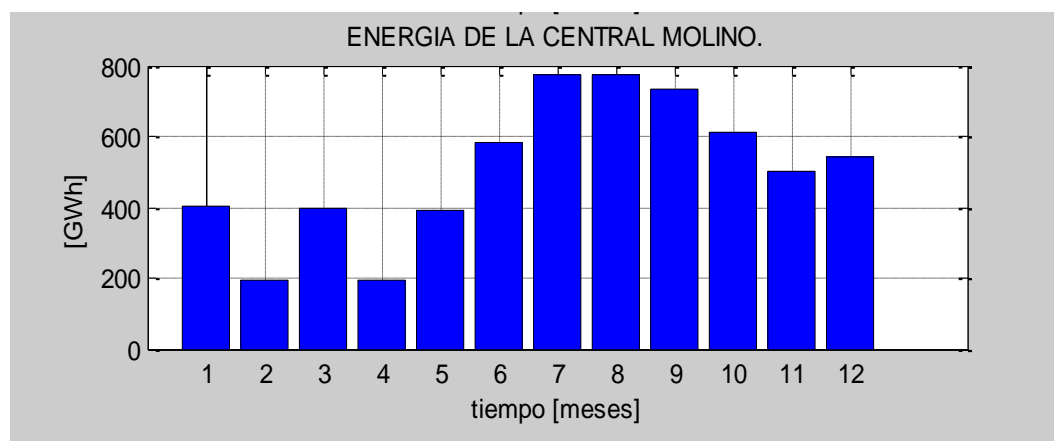


Figura L.93 Energía de la central Molino

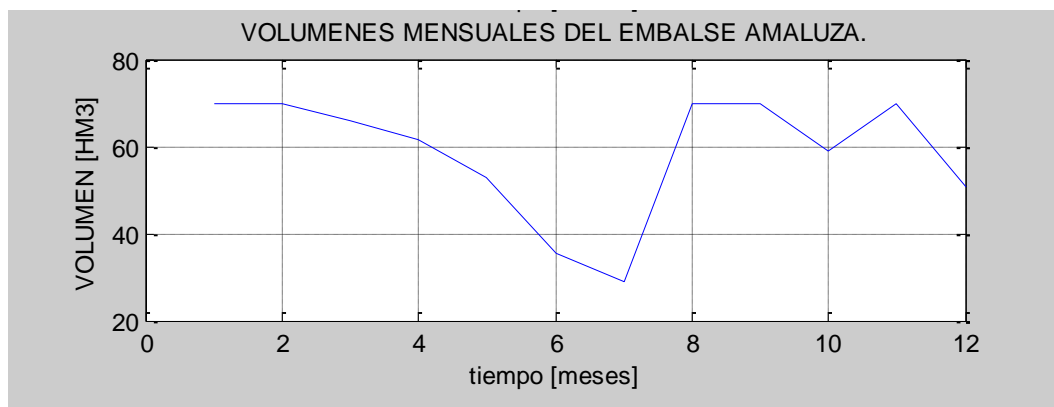


Figura L.94 Volumen mensual del embalse Amlauza

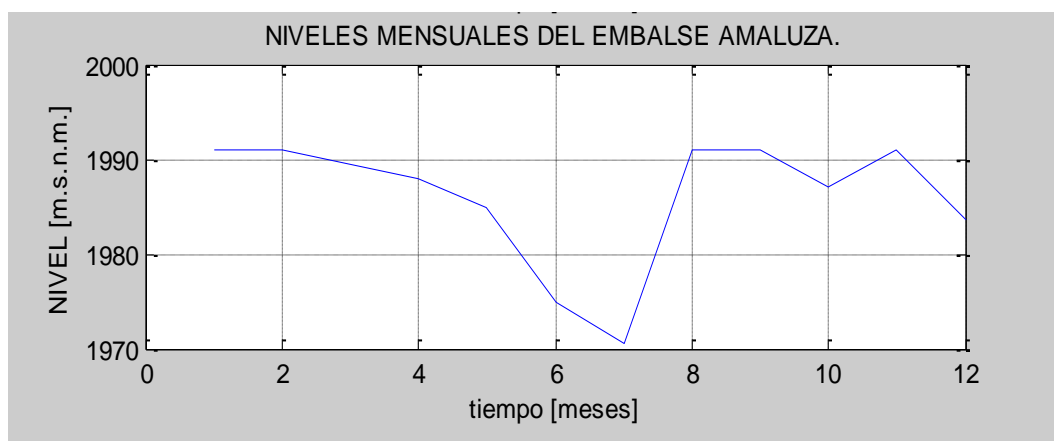


Figura L.95 Nivel mensual del embalse Amaluza

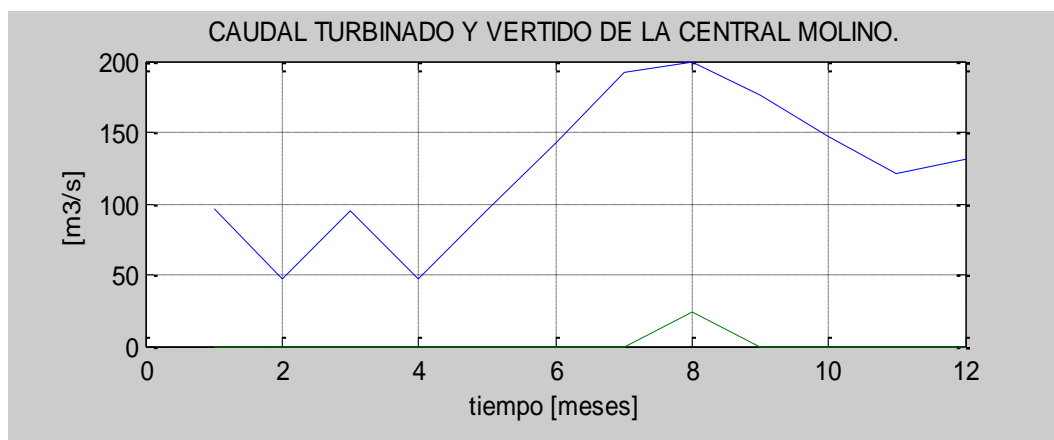


Figura L.96 Caudal turbinado y caudal vertido de la central Molino

En la siguiente tabla se resumen los resultados brindados por “prodipa”

Tabla L. 21 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino proporcionados por prodipa

MESES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1991	1991	1989.4	1988	1984.9	1974.9	1970.6	1991	1991	1987	1991	1983.5
Energía Molino [GWh]	400.6	196.9	395.7	193.1	391.3	582.8	774	774	732	611.9	498.9	542.3
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	96.3	47.3	95.2	46.5	94.7	142.6	191.6	199	176.1	147.6	120.3	131
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	0	0	0	0	0	0	0	161.1	0	0	0	0
Energía Complejo Paute [GWh]	6093.50											

En la siguiente tabla se indica las variables estadísticas de la central Molino desde octubre del año 1999 hasta septiembre del 2000:

Tabla L. 22 Estadística del embalse Amaluza y de la central Molino 1999-2000

MESES	Oct	Nov	dic	ene	Feb	mar	Abr	may	Jun	jul	Ago	Sep
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1990.96	1984.67	1981.28	1980.71	1978.81	1990.81	1976.8	1990.91	1991.05	1991.06	1980.63	1983.49
Energía Molino [GWh]	410.447	204.669	398.327	198.78	292.16	558.63	517.64	535.32	529.70	515.53	466.28	450.85
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	98.5	49.1	95.9	49.0	66.5	134.4	126.1	130.1	129.4	123.7	111.7	108.0
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	5.4	0.0	1.4	0.0	4.8	20.6	50.2	159.9	49.7	34.9	14.4	10.1
Energía Complejo Paute [GWh]	5078.32											

## ANEXO M Prueba del modelo año hidrológico 2000 considerando el embalse y la central Mazar

### Datos iniciales:

Tabla M. 23 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel final m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 983,28	1 983,5
Mazar	2151,5	2153,0

Tabla M. 24 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MAZAR Y MOLINO [horas]												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	Ago	sep
U1 Mz	0.0	120	0.0	9.5	0.0	0.0	9.5	0.0	120	0.0	9.5	0.0
U2 Mz	696	0.0	9.5	0.0	0.0	9.5	0.0	120	0.0	9.5	0.0	9.5
U1	211.62	0.40	10.00	0.00	9.5	3.63	66.83	5.23	13.17	0.00	8.75	24.80
U2	17.53	9.58	0.00	9.00	0	56.38	0.00	29.33	4.00	86.83	21.90	204.25
U3	100.95	130.13	0.00	11.50	0	9.13	54.83	24.08	7.75	0.00	19.00	5.42
U4	17.00	8.50	0.00	0.00	81.333	0.00	3.68	9.00	9.00	0.00	136.50	86.63
U5	17.17	229.85	4.00	4.00	13.75	45.55	9.57	0.00	123.48	3.67	9.00	5.15
U6	9.85	10.08	202.00	0.00	9.5	7.23	0.00	80.63	0.00	3.67	0.00	9.50
U7	9.08	24.52	4.00	176.18	5.367	14.83	10.05	19.22	9.47	59.50	13.83	0.00
U8	8.50	9.20	3.50	0.00	0	202.42	0.00	4.17	1.13	12.63	0.00	67.08
U9	0.00	26.35	2.50	232.50	10.483	10.50	0.00	3.67	0.00	64.50	0.00	9.50
U10	9.45	18.88	62.75	0.00	253.7	0.00	9.00	0.00	3.50	2.08	67.00	0.00

### Resultados de prodipa:

En las siguientes figuras se presentan los resultados gráficos que brinda el algoritmo “prodipa”.

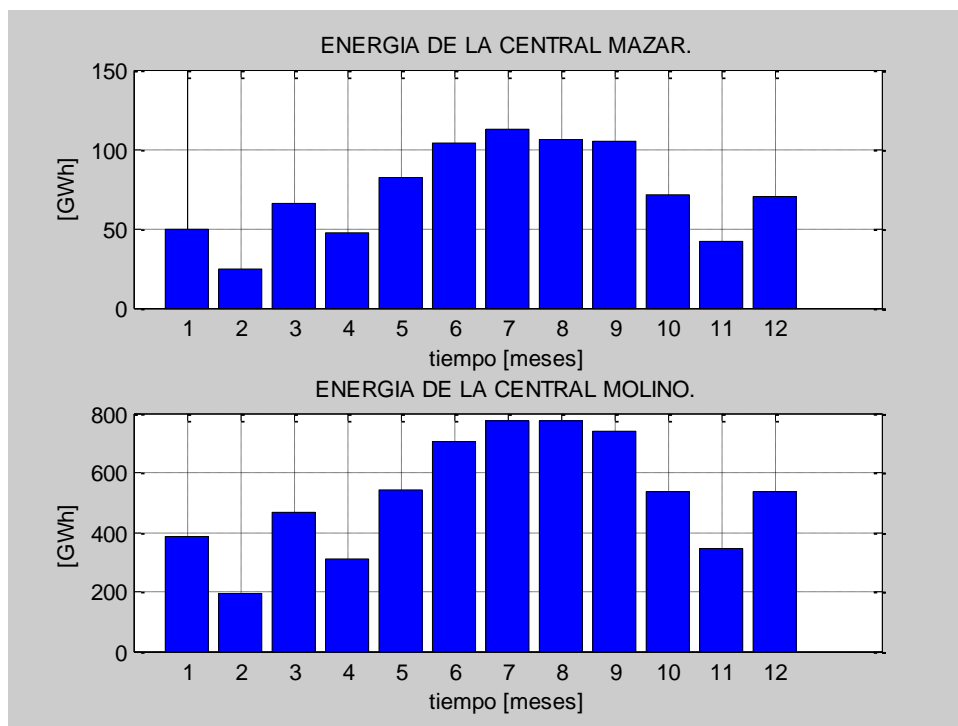


Figura M.97 Producción de energía para la central Mazar y central Molino

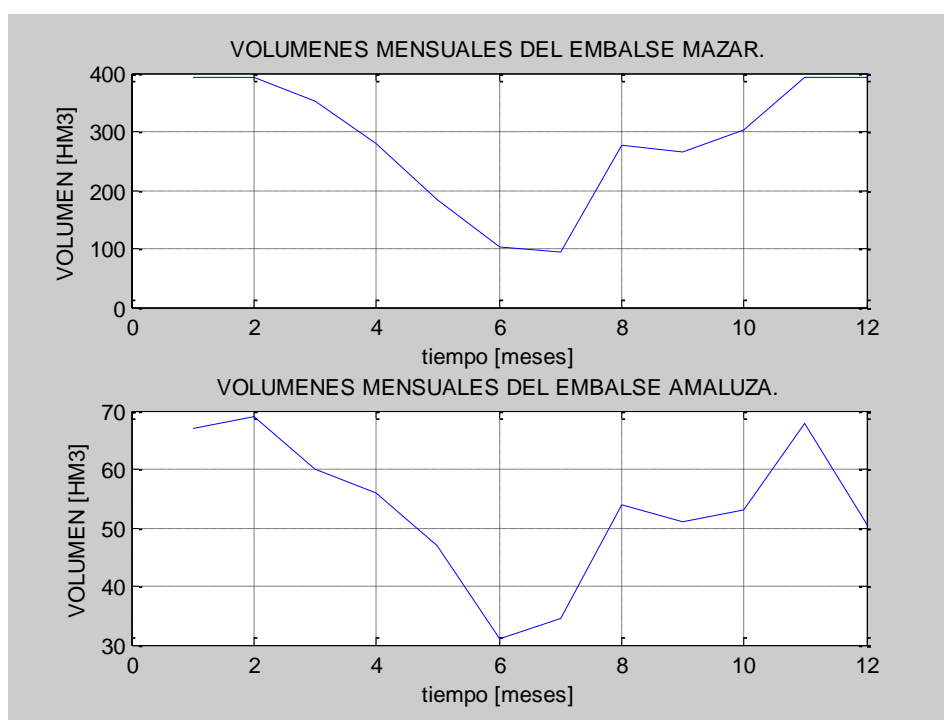


Figura M.98 Volúmenes mensuales de los embalses Mazar y Amaluza



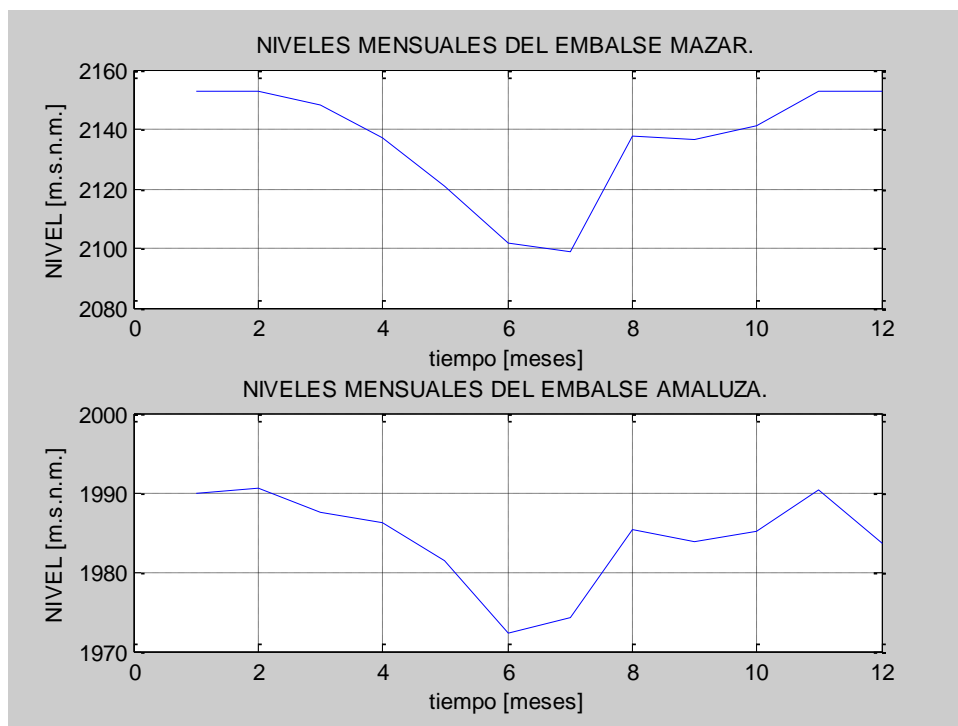


Figura M.99 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

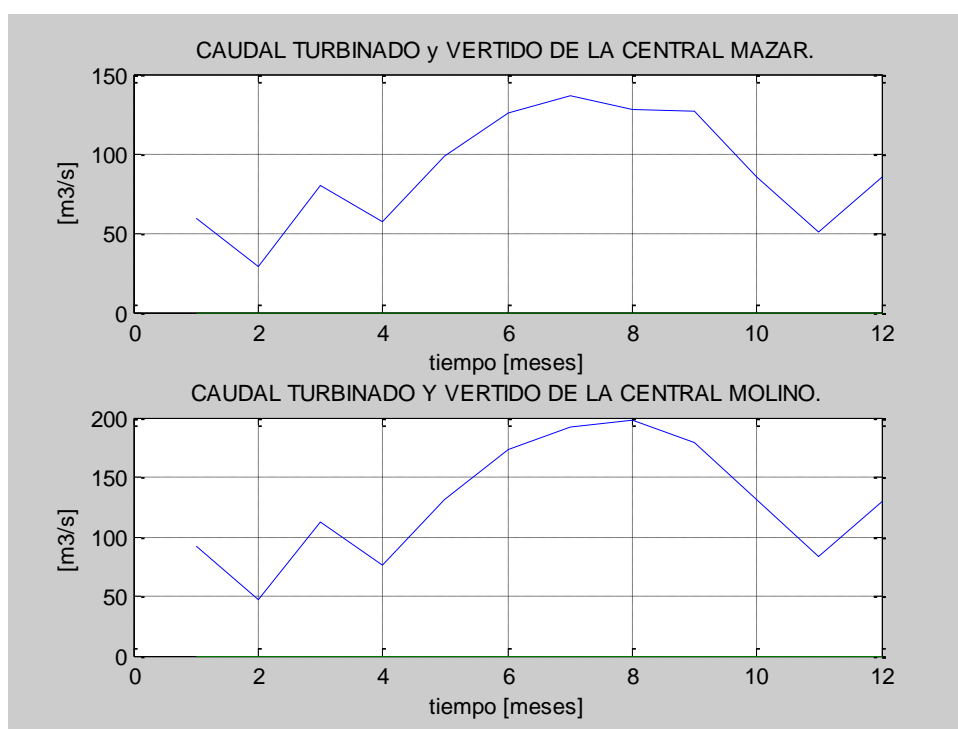


Figura M.100 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

En la tabla que se presenta a continuación se indican los valores resultantes de la simulación realizada considerando el año hidrológico del año 2000

Tabla M. 25 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

MESES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2153	2153	2147.9	2137.4	2120.9	2101.9	2099.1	2137.5	2136.6	2141.1	2153	2153
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1989.8	1990.6	1987.4	1986.1	1981.4	1972.2	1974.3	1985.4	1983.8	1985	1990.2	1983.5
Energía Mazar [GWh]	49	24.3	65.9	47.7	81.8	103.5	112.6	105.6	105.2	70.8	42.3	70.6
Energía Molino [GWh]	385.2	193.5	467.9	312.1	540.4	701.7	773.8	774	738.5	539.1	346.9	538.9
Caudal Turbinado Mazar [m3/s]	59.1	29.3	79.5	57.5	98.8	125.1	136.1	127.5	127	85.4	51	85.1
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	92.7	46.5	112.8	75.5	131.3	172.5	191.5	198.5	179.4	130.9	83.8	130.2
Volumen Vertido Mazar [hm3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía Complejo Paute [GWh]	7191.30											

## ANEXO N Simulación de la central Molino sin considerar la central Mazar periodo 1994 - 2011

### Datos iniciales:

Tabla N. 26 Valores iniciales del embalse Amaluza

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel máximo m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 986,7	1 991,0

Tabla N. 27 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Molino  
[Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MOLINO [horas]												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
U1	0.00	9.50	0.00	300.00	0	9.50	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50
U2	300.00	0.00	9.50	0.00	9.5	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	0.00
U3	9.50	0.00	9.50	0.00	300	0.00	96.00	0.00	9.50	0.00	82.00	0.00
U4	9.50	0.00	300.00	0.00	9.5	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50	0.00
U5	0.00	9.50	0.00	9.50	0	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	300.00
U6	82.00	0.00	9.50	0.00	0	300.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00	82.00
U7	0.00	0.00	9.50	0.00	0	720.00	330.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00
U8	82.00	0.00	0.00	9.50	0	300.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00
U9	0.00	9.50	0.00	0.00	225	0.00	0.00	96.00	0.00	0.00	82.00	0.00
U10	0.00	720.00	720.00	720.00	720	16.00	0.00	96.00	0.00	0.00	0.00	225.00

### Resultados de prodipa:

En las gráficas que continúan muestran los resultados de la simulación realizada en el periodo 1994-2011 de los registros históricos

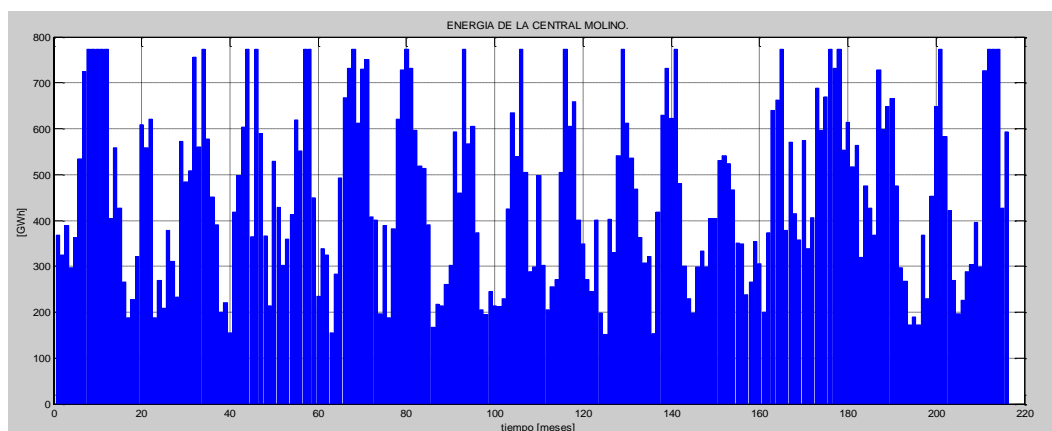


Figura N.101 Producción de energía de la central Molino periodo 1994-2011

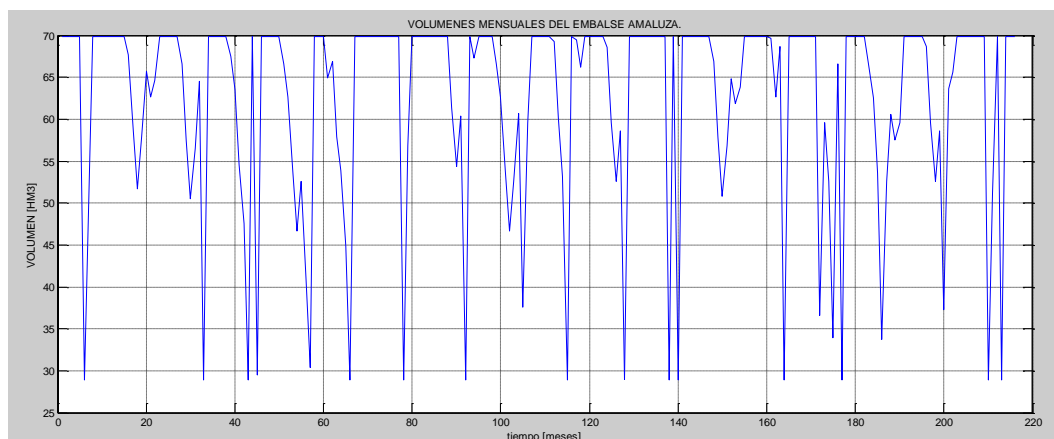


Figura N.102 Volúmenes mensuales del embalse Amaluza periodo 1994-2011

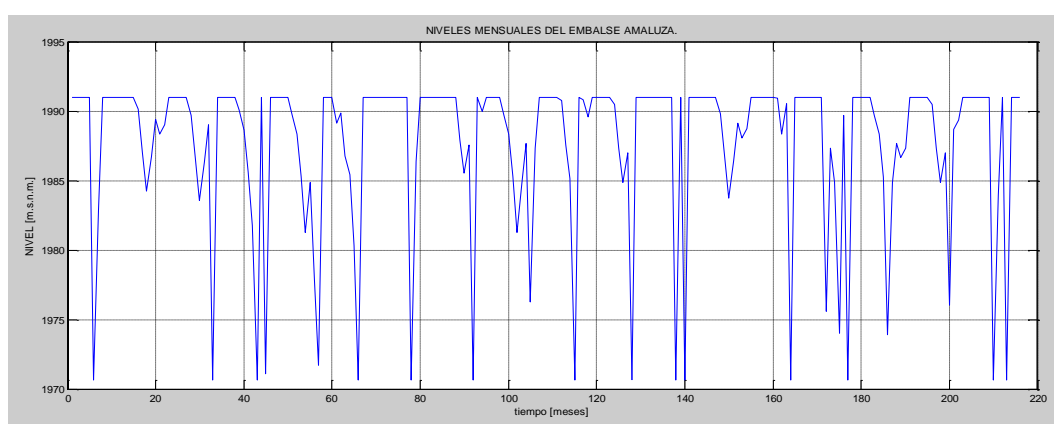


Figura N.103 Niveles mensuales del embalse Amaluza periodo 1994-2011

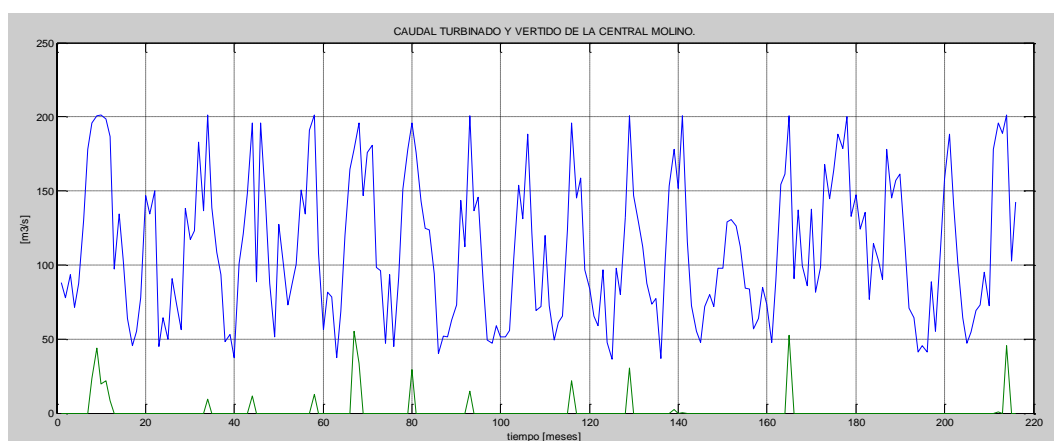


Figura N.104 Caudal turbinado y vertido de la central Molino periodo 1994-2011

## ANEXO O Simulación de la central Molino con la consideración de la central Mazar periodo 1994 - 2011

### Datos iniciales:

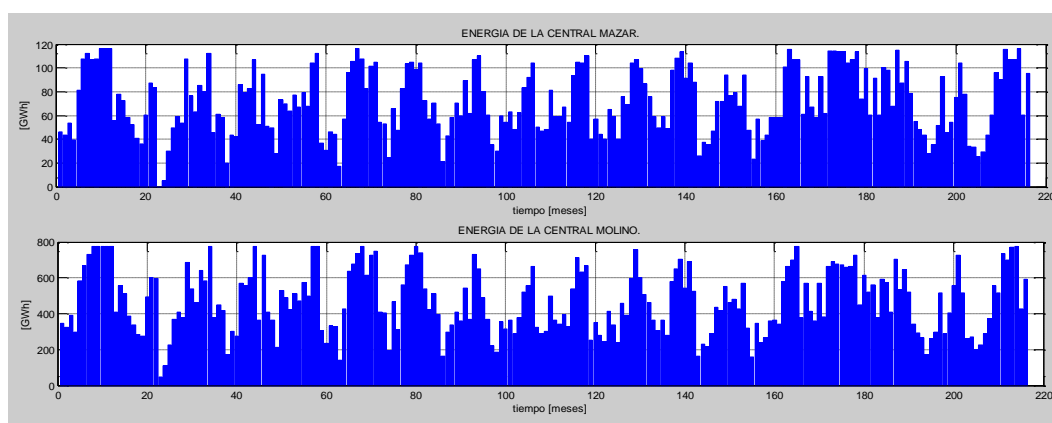
Tabla O. 28 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel máximo m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 990,96	1 991,0
Mazar	2151,5	2153,0

Tabla O. 29 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MAZAR YMOLINO												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
U1 Mz	0.00	120.00	0.00	9.50	0	0.00	9.50	0.00	120.00	0.00	9.50	0.00
U2 Mz	696.00	0.00	9.50	0.00	0	9.50	0.00	120.00	0.00	9.50	0.00	9.50
U1	0.00	9.50	0.00	300.00	0	9.50	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50
U2	300.00	0.00	9.50	0.00	9.5	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	0.00
U3	9.50	0.00	9.50	0.00	300	0.00	96.00	0.00	9.50	0.00	82.00	0.00
U4	9.50	0.00	300.00	0.00	9.5	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50	0.00
U5	0.00	9.50	0.00	9.50	0	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	300.00
U6	82.00	0.00	9.50	0.00	0	300.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00	82.00
U7	0.00	0.00	9.50	0.00	0	720.00	330.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00
U8	82.00	0.00	0.00	9.50	0	300.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00
U9	0.00	9.50	0.00	0.00	225	0.00	0.00	96.00	0.00	0.00	82.00	0.00
U10	0.00	720.00	720.00	720.00	720	16.00	0.00	96.00	0.00	0.00	0.00	225.00

### Resultados de prodipa:



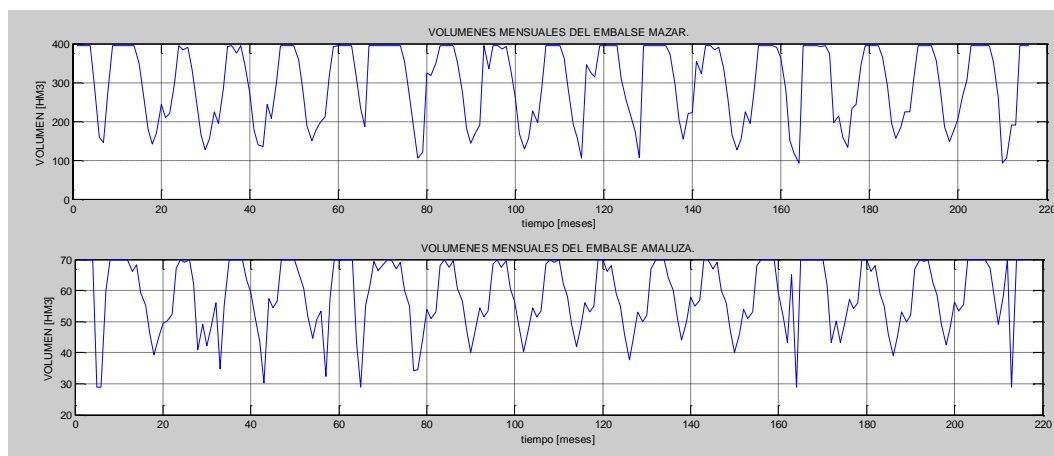


Figura O.106 Volúmenes mensuales de los embalses Mazar y Amaluza periodo 1994-2011

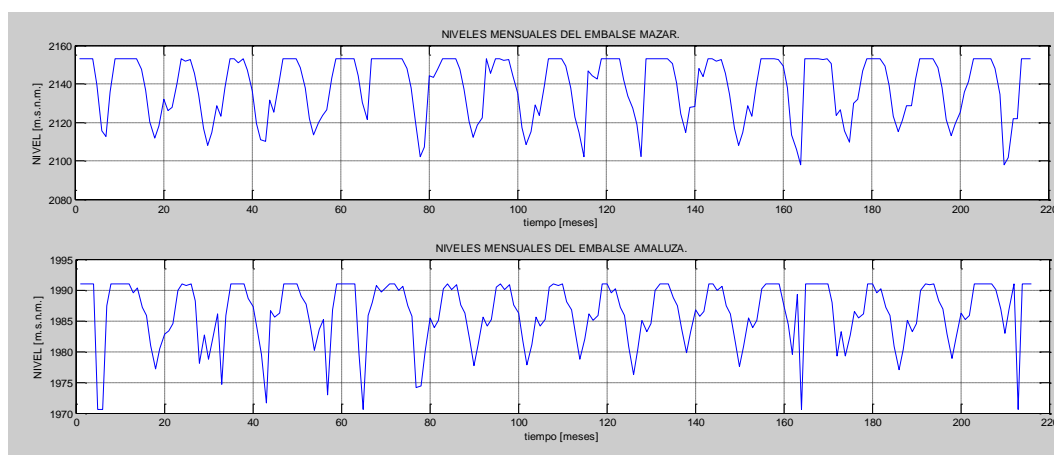


Figura O.107 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza periodo 1994-2011

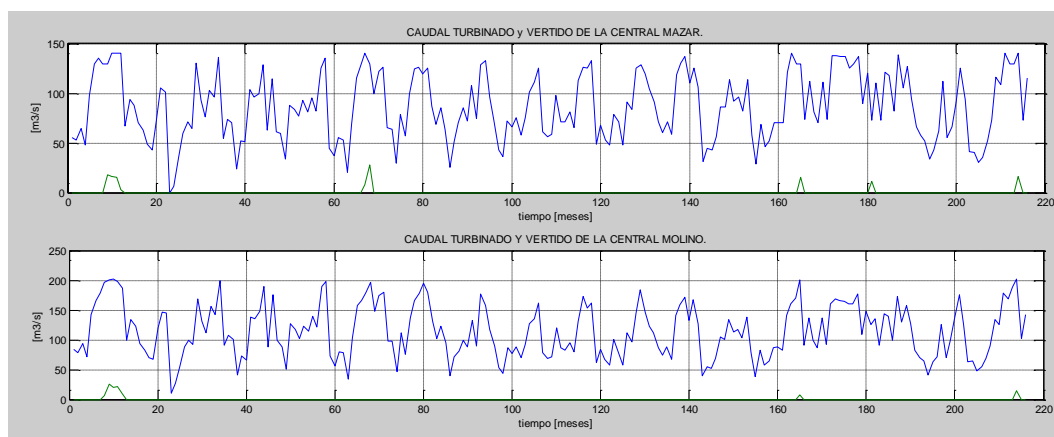



Figura O.108 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino periodo 1994-2011

## ANEXO P Programa de mantenimiento de las unidades de la central de Mazar y Molino periodo octubre 2011 septiembre 2012

Tabla P. 30 Programa de mantenimiento anual de las unidades de la central Mazar y Molino periodo octubre 2011 septiembre 2012

	CENTRAL HIDROELECTRICA PAUTE MOLINO Y MAZAR						Página: 2 de 2
	PLAN ANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LAS UNIDADES DE GENERACIÓN						Revisión: 02
	Periodo: octubre 2011 - septiembre 2012						Código: ML-MT-03
							Fecha Elab: 2011/08/29
CENTRAL	UNIDAD	MES	FECHA INICIO	FECHA DE TERMINO	HORAS DE DURACIÓN	POTENCIA RESTRINGIDA	BREVE DESCRIPCION DEL TRABAJO
<b>AÑO 2011</b>							
<b>SEPTIEMBRE</b>							
MOLINO	UNIDAD 01	SEPTIEMBRE	01/09/2011	01/09/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	SEPTIEMBRE	03/09/2011	12/09/2011	225	100	MANT. ANUAL
MAZAR	UNIDAD 2	SEPTIEMBRE	15/09/2011	29/10/2011	1050	80	MANT. 4000 HORAS + INSPECCIÓN ROTOR
MOLINO	UNIDAD 07	SEPTIEMBRE	16/09/2011	19/10/2011	82	115	MANT. SEMESTRAL
<b>OCTUBRE</b>							
MOLINO	UNIDAD 04	OCTUBRE	06/10/2011	06/10/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 02	OCTUBRE	07/10/2011	20/10/2011	300	100	MANT. ANUAL+CALIBRACIÓN
MOLINO	UNIDAD 06	OCTUBRE	21/10/2011	24/10/2011	82	115	MANT. SEMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 03	OCTUBRE	27/10/2011	27/10/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 08	OCTUBRE	28/10/2011	31/10/2011	82	115	MANT. SEMESTRAL
<b>NOVIEMBRE</b>							
MOLINO	UNIDAD 10	NOVIEMBRE	01/11/2011	02/03/2012	2880	100	REPARACIÓN DEFINITIVA GENERADOR + SEMESTRAL
MAZAR	UNIDAD 1	NOVIEMBRE	04/11/2011	10/11/2011	120	80	MANT. 8000 HORAS
MOLINO	UNIDAD 01	NOVIEMBRE	06/11/2011	06/11/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	NOVIEMBRE	19/11/2011	19/11/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 09	NOVIEMBRE	26/11/2011	26/11/2011	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
<b>DICIEMBRE</b>							
MOLINO	UNIDAD 04	DICIEMBRE	03/12/2011	16/12/2011	300	100	MANT. ANUAL+CALIBRACIÓN COJINETES
MOLINO	UNIDAD 07	DICIEMBRE	17/12/2011	17/12/2011	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 02	DICIEMBRE	18/12/2011	18/12/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 03	DICIEMBRE	24/12/2011	24/12/2011	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MAZAR	UNIDAD 2	DICIEMBRE	30/12/2011	30/12/2011	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 06	DICIEMBRE	31/12/2011	31/12/2011	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
<b>AÑO 2012</b>							
<b>ENERO</b>							
MOLINO	UNIDAD 08	ENERO	01/01/2012	01/01/2012	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 01	ENERO	06/01/2012	19/01/2012	300	100	MANT. ANUAL+CALIBRACIÓN COJINETES
MOLINO	UNIDAD 05	ENERO	21/01/2012	21/01/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MAZAR	UNIDAD 1	ENERO	22/01/2012	22/01/2012	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
<b>FEBRERO</b>							
MOLINO	UNIDAD 09	FEBRERO	04/02/2012	13/02/2012	225	115	MANT. ANUAL
MOLINO	UNIDAD 04	FEBRERO	16/02/2012	16/02/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 02	FEBRERO	17/02/2012	17/02/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 03	FEBRERO	18/02/2012	02/03/2012	300	100	MANT. ANUAL+CALIBRACIÓN
<b>MARZO</b>							
MAZAR	UNIDAD 2	MARZO	02/03/2011	02/03/2011	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 10	MARZO		02/03/2012	2880	100	FIN REPARACIÓN
MOLINO	UNIDAD 06	MARZO	03/03/2012	15/03/2012	300	115	MANT. ANUAL+ CAMBIO
MOLINO	UNIDAD 01	MARZO	16/03/2012	16/03/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 08	MARZO	17/03/2012	30/03/2012	300	115	MANT. ANUAL+INSTALACIÓN
MOLINO	UNIDAD 07	MARZO	31/03/2012	13/05/2012	1050	115	MANT. ANUAL+ REPARACIÓN



ABRIL							
MAZAR	UNIDAD 1	ABRIL	04/04/2012	04/04/2012	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	ABRIL	05/04/2012	12/04/2012	192	100	MANT. SEMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MOLINO	UNIDAD 04	ABRIL	13/04/2012	17/04/2012	96	100	MANT. BIMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MOLINO	UNIDAD 02	ABRIL	20/04/2012	27/04/2012	192	100	MANT. SEMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MOLINO	UNIDAD 03	ABRIL	28/04/2012	02/05/2012	96	100	MANT. BIMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MAYO							
MOLINO	UNIDAD 09	MAYO	04/05/2012	08/05/2012	96	115	MANT. TRIMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MAZAR	UNIDAD 2	MAYO	11/05/2012	15/05/2012	120	80	MANT.8000 HORAS
MOLINO	UNIDAD 01	MAYO	18/05/2012	22/05/2012	96	115	MANT. BIMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
MOLINO	UNIDAD 10	MAYO	25/05/2012	29/05/2012	96	100	MANT. TRIMESTRAL+INSTALACIÓN SISTEMA VIBRACIONES Y ANTI EXPLOSIÓN TRANSFORMADORES
JUNIO							
MAZAR	UNIDAD 1	JUNIO	01/06/2012	05/06/2012	120	80	MANT.12000 HORAS
MOLINO	UNIDAD 04	JUNIO	08/06/2011	11/06/2011	82	100	MANT. SEMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	JUNIO	17/06/2012	17/06/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 02	JUNIO	23/06/2012	23/06/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 06	JUNIO	24/06/2012	24/06/2012	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 03	JUNIO	30/06/2012	30/06/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
JULIO							
MOLINO	UNIDAD 08	JULIO	14/07/2012	14/07/2012	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
MAZAR	UNIDAD 2	JULIO	15/07/2012	15/07/2012	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 01	JULIO	20/07/2012	23/07/2012	82	100	MANT. SEMESTRAL
AGOSTO							
MAZAR	UNIDAD 1	AGOSTO	04/08/2012	04/08/2012	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	AGOSTO	11/08/2012	11/08/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 07	AGOSTO	12/08/2012	12/08/2012	9.5	115	MANT. TRIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 04	AGOSTO	16/08/2012	16/08/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 09	AGOSTO	17/08/2012	20/08/2012	82	115	MANT. SEMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 02	AGOSTO	23/08/2012	23/08/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 03	AGOSTO	24/08/2012	27/08/2012	82	100	MANT. SEMESTRAL
SEPTIEMBRE							
MOLINO	UNIDAD 10	SEPTIEMBRE	01/09/2012	10/09/2012	225	115	MANT. ANUAL
MAZAR	UNIDAD 2	SEPTIEMBRE	15/09/2012	15/09/2012	9.5	80	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 01	SEPTIEMBRE	16/09/2012	16/09/2012	9.5	100	MANT. BIMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 06	SEPTIEMBRE	21/09/2012	24/09/2012	82	115	MANT. SEMESTRAL
MOLINO	UNIDAD 05	SEPTIEMBRE	28/09/2012	11/10/2012	300	100	MANT. ANUAL+CALIBRACIÓN COJINETES



## ANEXO Q Simulación del modelo en el periodo octubre 2011 septiembre 2012

### Datos iniciales:

Tabla Q. 31 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel máximo m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 990,2	1 991,0
Mazar	2151,5	2153,0

Tabla Q. 32 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MAZAR Y MOLINO [horas]												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
U1 Mz	0.00	120.00	0.00	9.50	0	0.00	9.50	0.00	120.00	0.00	9.50	0.00
U2 Mz	696.00	0.00	9.50	0.00	0	9.50	0.00	120.00	0.00	9.50	0.00	9.50
U1	0.00	9.50	0.00	300.00	0	9.50	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50
U2	300.00	0.00	9.50	0.00	9.5	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	0.00
U3	9.50	0.00	9.50	0.00	300	0.00	96.00	0.00	9.50	0.00	82.00	0.00
U4	9.50	0.00	300.00	0.00	9.5	0.00	96.00	0.00	82.00	0.00	9.50	0.00
U5	0.00	9.50	0.00	9.50	0	0.00	192.00	0.00	9.50	0.00	9.50	300.00
U6	82.00	0.00	9.50	0.00	0	300.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00	82.00
U7	0.00	0.00	9.50	0.00	0	720.00	330.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00
U8	82.00	0.00	0.00	9.50	0	300.00	0.00	0.00	0.00	9.50	0.00	0.00
U9	0.00	9.50	0.00	0.00	225	0.00	0.00	96.00	0.00	0.00	82.00	0.00
U10	0.00	720.00	720.00	720.00	720	16.00	0.00	96.00	0.00	0.00	0.00	225.00

### Resultados del plan anual del CENACE:

De acuerdo al plan anual de operación del SNI del CENACE en el periodo de análisis se extraen a continuación los resultados más relevantes

Tabla Q. 33 Resultados del embalse y de la central Mazar dentro del Plan de operación del SNI

MESES	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may-12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12
<b>Probabilidad 10% nivel</b>	2153.0	2153.0	2145.1	2129.3	2133.2	2141.7	2152.5	2153.0	2153.0	2153.0	2153.0	2153.0
<b>ENERGIA GWh</b>	60.5	101.4	86.6	90.4	84.7	89.5	77.4	108.3	105.3	118.7	115.7	94.3
<b>vertimiento</b>	121.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	115.8	106.9	9.1	0.0
<b>Promedio nivel</b>	2152.6	2152.9	2142.6	2129.6	2117.4	2111.7	2124.2	2133.4	2138.5	2150.3	2152.5	2152.7
<b>ENERGIA GWh</b>	59.5	74.2	62.1	72.7	68.0	70.8	56.3	68.8	83.2	76.9	76.4	61.2
<b>Vertimiento</b>	56.3	3.1	0.3	0.0	0.0	0.0	3.7	5.7	20.9	30.0	5.6	0.0
<b>Probabilidad 90% nivel</b>	2149.9	2153.0	2141.8	2129.3	2111.7	2100.4	2108.9	2124.4	2118.4	2141.8	2150.4	2151.7
<b>ENERGIA GWh</b>	55.0	50.4	46.0	56.6	50.7	51.2	36.6	28.2	61.3	27.2	29.7	39.5
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla Q. 34 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino dentro del Plan de operación del SNI

MESES	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may-12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12
<b>Probabilidad 10% nivel</b>	1991.0	1991.0	1991.0	1982.3	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0
<b>ENERGIA GWh</b>	594.2	586.2	511.7	585.2	523.4	645.6	572.9	742.1	752.6	780.8	768.7	601.1
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	54.0	116.7	1.3	0.0
<b>Promedio nivel</b>	1990.6	1991.0	1986.3	1982.6	1984.7	1975.9	1982.2	1985.1	1983.7	1990.2	1990.8	1990.7
<b>ENERGIA GWh</b>	451.0	420.5	378.3	437.0	447.5	557.4	493.2	568.4	655.0	587.7	523.8	415.1
<b>Vertimiento</b>	1.4	0.9	1.0	0.0	0.0	1.9	14.4	10.1	18.7	36.5	5.5	0.1
<b>Probabilidad 90% nivel</b>	1987.9	1991.0	1984.0	1982.3	1977.1	1972.5	1976.6	1981.9	1979.4	1991.0	1991.0	1989.5
<b>ENERGIA GWh</b>	322.7	279.2	286.6	312.0	333.9	417.2	372.0	311.3	530.1	355.9	241.0	256.1
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

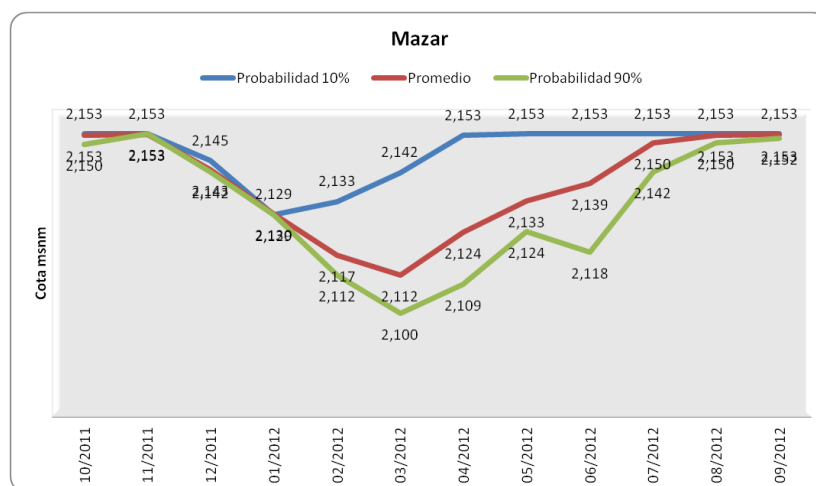


Figura Q.109 Trayectoria del embalse de Mazar periodo octubre 2011 – septiembre 2012

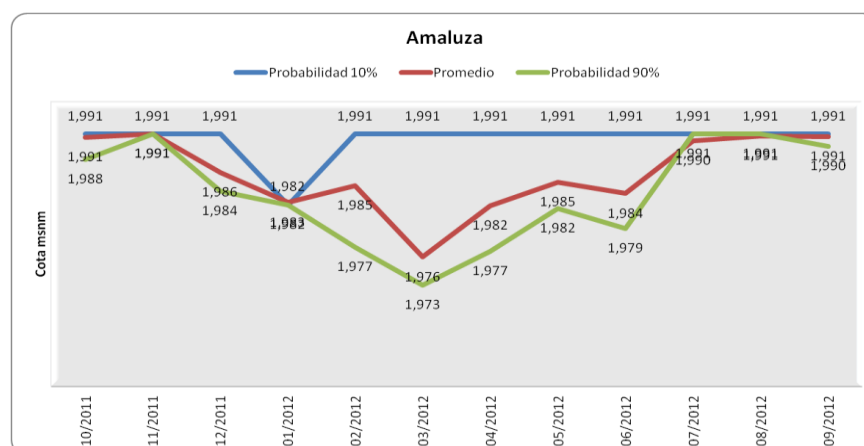


Figura Q.110 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo octubre 2011 – septiembre 2012

### Resultados de prodipa:

A continuación se muestran los resultados del algoritmo considerando tres escenarios con probabilidad de excedencia hidrológica del 10%, 90% y promedio de los caudales históricos registrados

### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

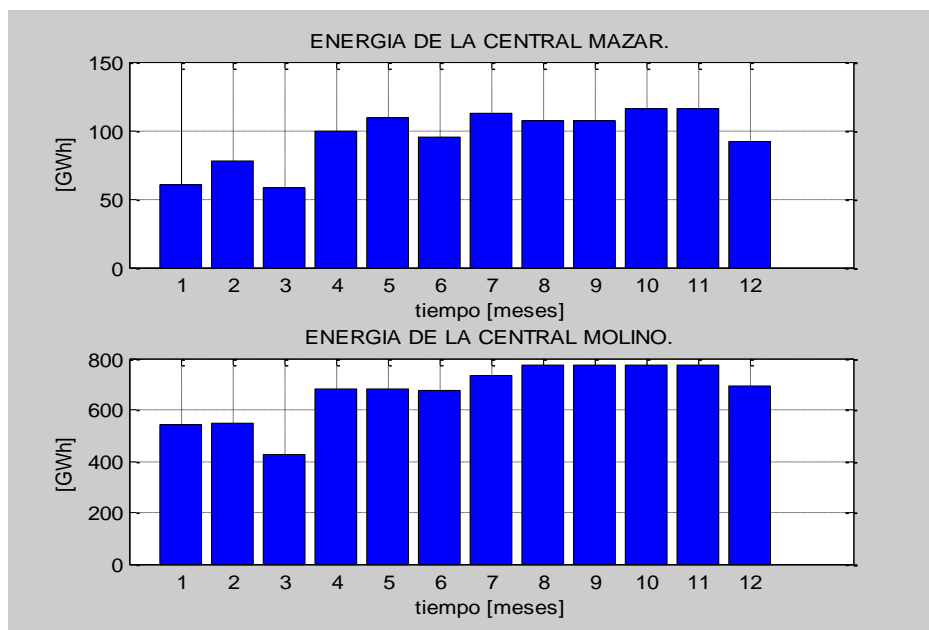


Figura Q.111 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

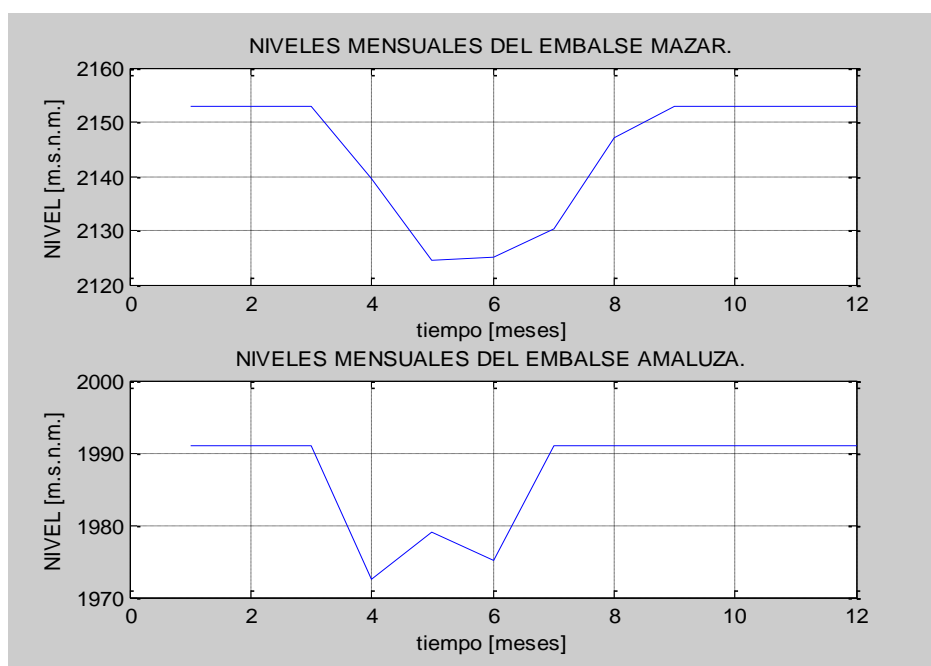


Figura Q.112 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

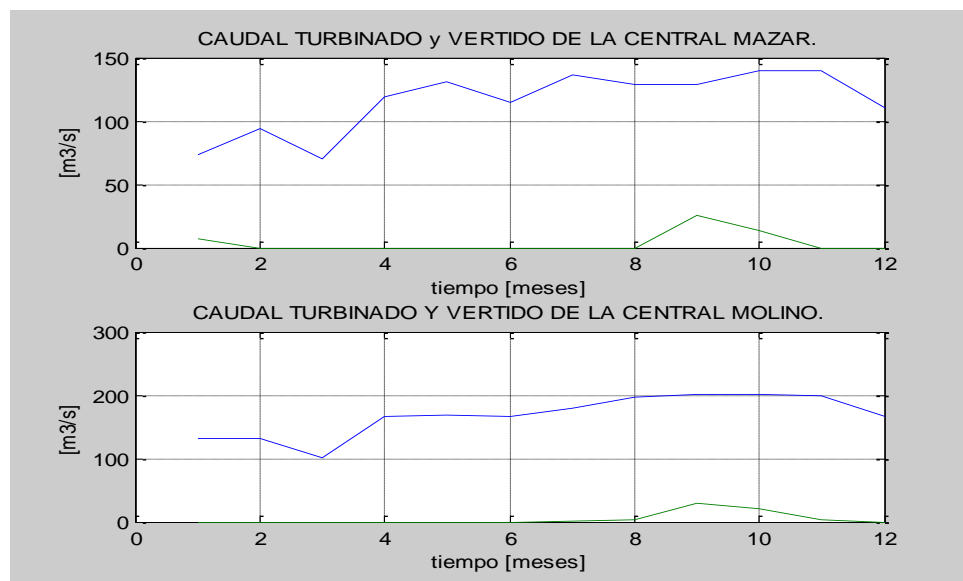


Figura Q.113 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla Q. 35 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2153	2153	2152.9	2139.4	2124.3	2124.9	2130.5	2147.4	2153	2153	2153	2153
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1991	1991	1991	1972.4	1978.9	1975	1991	1991	1991	1991	1991	1991
Energía Mazar [GWh]	60.4	77.7	58.5	99.6	108.9	94	112.6	107.2	107.2	116.2	115.9	91.8
Energía Molino [GWh]	544.3	545.6	423.2	682.4	682.8	674.7	734.2	774	774	774	774	692.5
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	72.9	93.8	70.6	120.1	131.5	113.5	136	129.3	129.3	140.2	139.8	110.6
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	130.9	131.2	101.7	166.1	168.2	165.9	178.3	195.8	200.6	201.4	198.3	166.5
Volumen Vertido Mazar [hm³]	46.5	0	0	0	0	0	0	0	175.3	92.7	0	0
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0	0	0	0	0	0	4.9	15.7	204.6	136.6	16.3	0
Energía Complejo Paute [GWh]	9225.7											

## Hidrología Promedio

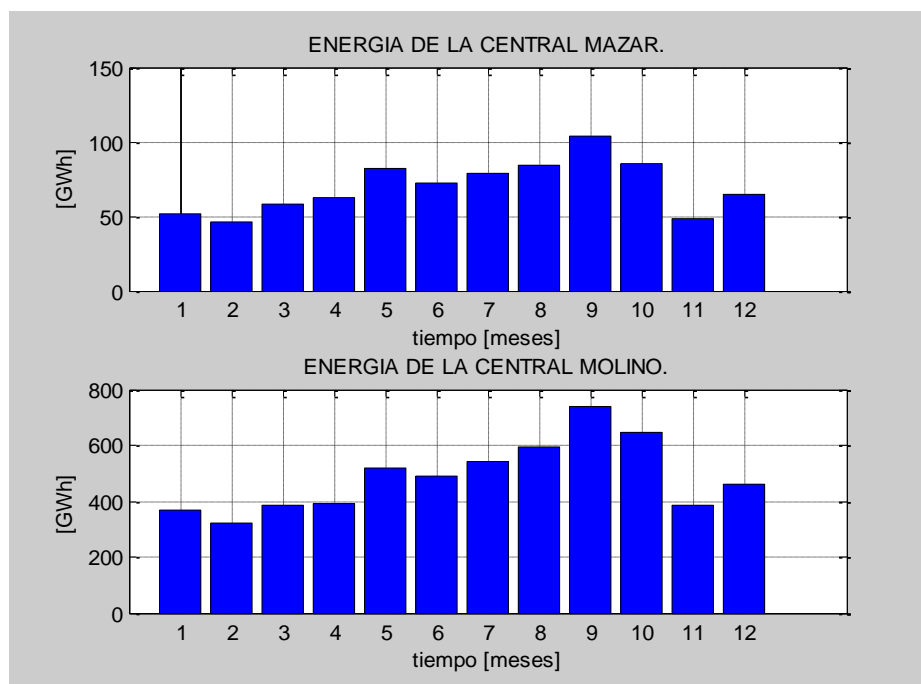


Figura Q.114 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

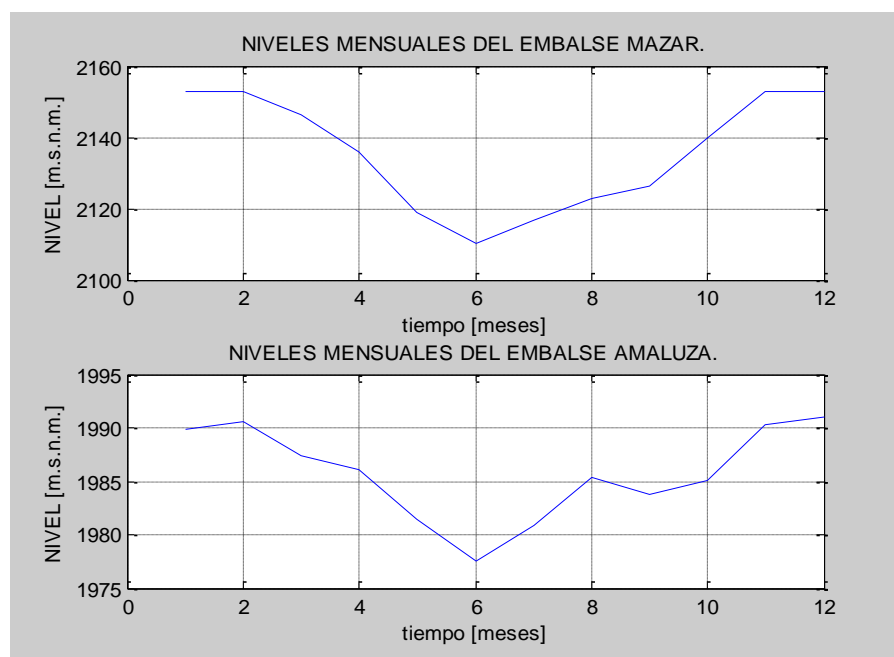


Figura Q.115 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

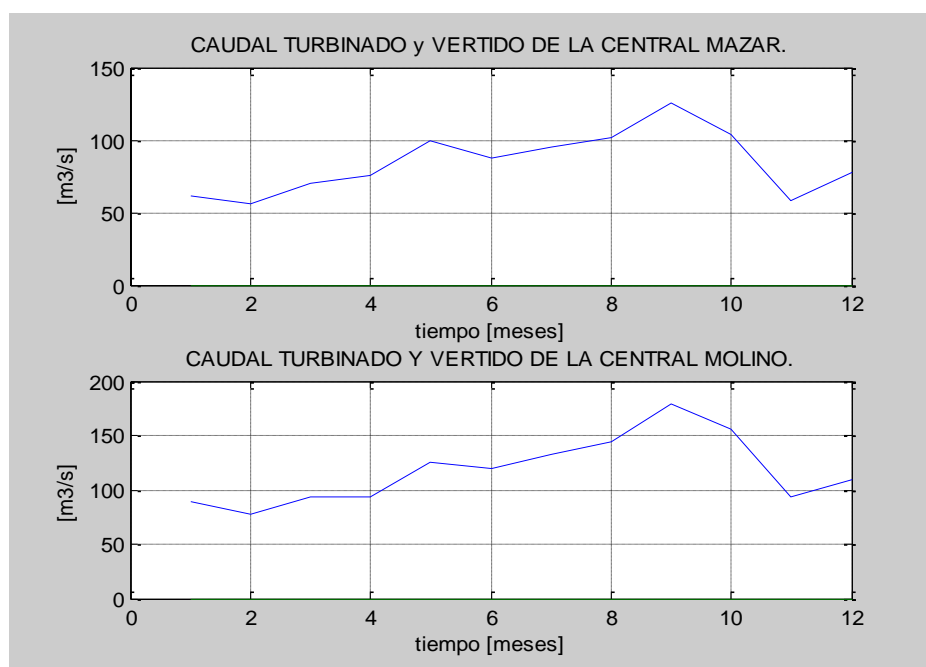


Figura Q.116 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla Q. 36 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2153.00	2153.0	2150.6	2142.3	2127.2	2119.9	2125.4	2130.7	2133.6	2145.7	2153.0	2153.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1991.0	1991.0	1991.0	1990.2	1987.1	1984.4	1986.8	1989.5	1988.4	1989.1	1991.0	1991.0
Energía Mazar [GWh]	51.00	47.00	47.70	58.70	82.10	72.80	78.80	84.30	104.10	85.60	62.10	64.40
Energía Molino [GWh]	364.30	328.20	319.20	373.70	522.60	494.50	548.00	598.00	744.40	648.30	473.00	461.40
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	61.50	56.70	57.60	70.80	99.20	87.90	95.10	101.80	125.70	103.30	74.90	77.70
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	87.60	78.80	76.70	89.80	126.10	119.80	132.80	144.40	179.70	156.40	113.80	110.80
Volumen Vertido Mazar [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	6714.2											

### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

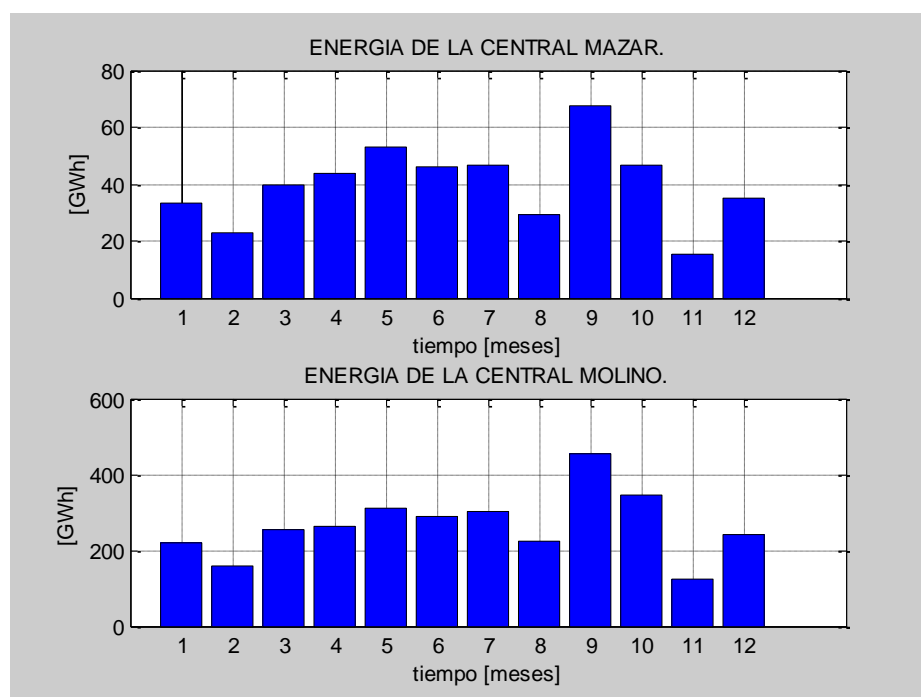


Figura Q.117 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

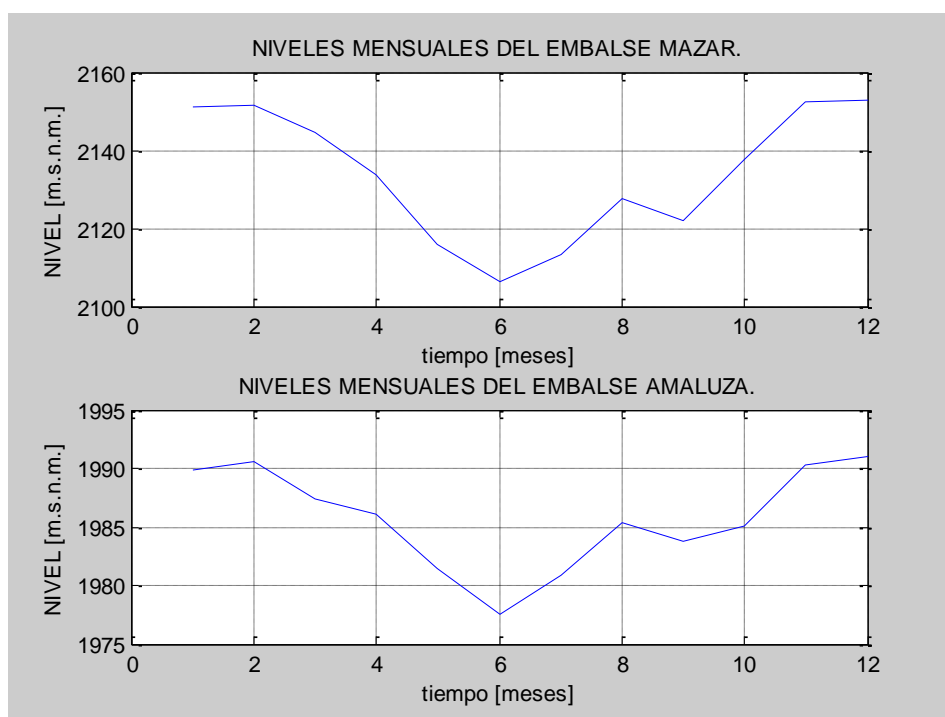


Figura Q.118 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

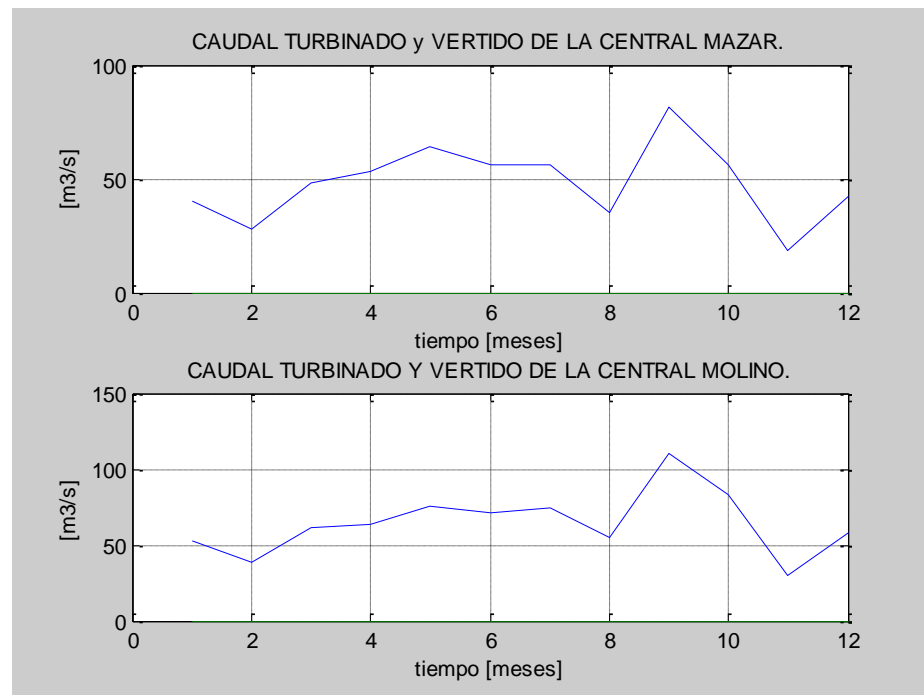


Figura Q.119 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla Q. 37 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2151.10	2151.7	2144.6	2133.5	2115.7	2106.5	2113.4	2127.6	2121.9	2137.4	2152.3	2153.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1989.80	1990.6	1987.4	1986.1	1981.4	1977.5	1980.9	1985.4	1983.8	1985.0	1990.2	1991.0
Energía Mazar [GWh]	33.40	23.10	39.80	43.90	53.00	46.30	46.40	29.00	67.30	46.80	15.50	35.30
Energía Molino [GWh]	218.30	159.10	254.20	262.20	312.20	290.40	302.40	225.80	452.80	343.80	125.00	240.00
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	40.20	27.80	48.00	53.00	63.90	56.00	56.10	35.00	81.30	56.50	18.60	42.60
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	52.50	38.30	61.30	63.40	75.80	71.00	74.00	54.90	109.90	83.40	30.20	57.70
Volumen Vertido Mazar [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	3666.0											



## ANEXO R Simulación del modelo en el periodo enero 2012 - diciembre 2012

### Datos iniciales:

Tabla R. 38 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel máximo m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 986,7	1 984,0
Mazar	2151,8	2142,0

Tabla R. 39 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MAZAR Y MOLINO [horas]												
Unidades	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
U1 Mz	9.50	0.00	0.00	9.50	0	120.00	0.00	9.50	0.00	57.00	0.00	0.00
U2 Mz	0.00	0.00	9.50	0.00	120	0.00	9.50	0.00	9.50	57.00	9.50	48.00
U1	300.00	0.00	9.50	0.00	96	0.00	82.00	0.00	9.50	0.00	0.00	0.00
U2	0.00	9.50	0.00	192.00	0	9.50	0.00	9.50	0.00	0.00	0.00	9.50
U3	0.00	300.00	0.00	96.00	0	9.50	0.00	82.00	0.00	9.50	168.00	682.00
U4	0.00	9.50	0.00	96.00	0	82.00	0.00	9.50	0.00	106.00	120.00	9.50
U5	9.50	0.00	0.00	192.00	0	9.50	0.00	9.50	300.00	226.00	9.50	0.00
U6	0.00	0.00	300.00	0.00	0	9.50	0.00	0.00	82.00	0.00	0.00	0.00
U7	0.00	0.00	720.00	330.00	0	0.00	0.00	9.50	0.00	9.50	0.00	0.00
U8	9.50	0.00	300.00	0.00	0	0.00	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	9.50
U9	0.00	225.00	0.00	0.00	96	0.00	0.00	82.00	0.00	0.00	0.00	9.50
U10	720.00	720.00	16.00	0.00	96	0.00	0.00	0.00	225.00	0.00	82.00	0.00

### Resultados del plan anual del CENACE:

De acuerdo al plan anual de operación del SNI del CENACE en el periodo de análisis se extraen a continuación los resultados más relevantes.

Tabla R. 40 Resultados del embalse y de la central Mazar dentro del Plan de operación del SNI

MESES	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may-12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12	oct-12	nov-12	dic-12
Prodipa 10% nivel	2136.3	2123.2	2121.7	2152.3	2152.9	2153.0	2153.0	2153.0	2153.0	2152.9	2150.2	2141.8
ENERGIA GWh	72.1	82.7	72.1	67.2	92.6	83.7	107.1	81.5	92.9	83.9	83.0	85.8
vertimiento	73.3	0.0	0.0	0.0	18.3	172.1	192.8	167.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio nivel	2130.4	2115.3	2106.2	2118.7	2130.8	2139.1	2148.2	2151.8	2152.0	2150.6	2150.3	2142.0
ENERGIA GWh	71.9	69.3	57.3	49.0	58.5	73.0	82.5	64.1	66.2	60.7	49.3	63.5
Vertimiento	39.1	0.0	0.0	2.5	11.7	44.0	46.7	44.7	2.1	2.6	0.0	0.0
Prodipa 90% nivel	2129.3	2111.7	2100.4	2108.9	2124.4	2118.3	2140.2	2150.3	2151.7	2149.9	2150.2	2141.8
ENERGIA GWh	72.1	47.4	37.2	32.2	28.4	54.9	36.6	29.3	33.6	39.2	21.3	45.4
vertimiento	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla R. 41 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino dentro del Plan de operación del SNI

MESES	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may-12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12	oct-12	nov-12	dic-12
<b>Prodipa 10% nivel</b>	1982.3	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1989.8
<b>ENERGIA GWh</b>	538.9	524.0	573.3	583.7	689.2	756.1	774.7	759.1	642.0	522.4	490.1	527.2
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	177.5	164.4	64.3	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Promedio nivel</b>	1982.3	1983.7	1976.0	1981.2	1984.6	1983.5	1990.2	1989.6	1989.3	1989.1	1988.4	1984.7
<b>ENERGIA GWh</b>	465.9	432.6	464.0	452.1	527.2	640.3	623.9	531.0	449.6	390.7	324.2	385.4
<b>Vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	9.8	4.2	34.1	44.7	16.7	1.1	1.6	0.0	0.0
<b>Prodipa 90% nivel</b>	1982.3	1977.1	1972.5	1976.6	1981.9	1979.4	1991.0	1987.5	1988.1	1987.3	1988.0	1984.0
<b>ENERGIA GWh</b>	389.2	314.1	311.7	263.9	285.6	513.1	356.4	264.3	234.5	254.8	181.9	266.3
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

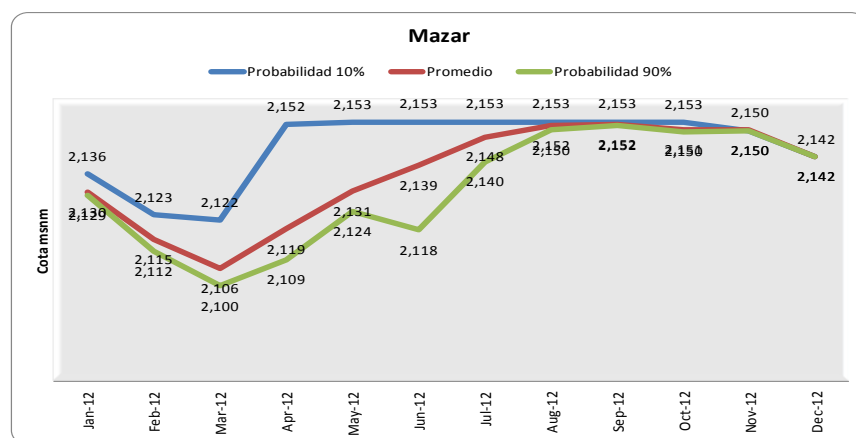


Figura R.120 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo enero 2012 – diciembre 2012

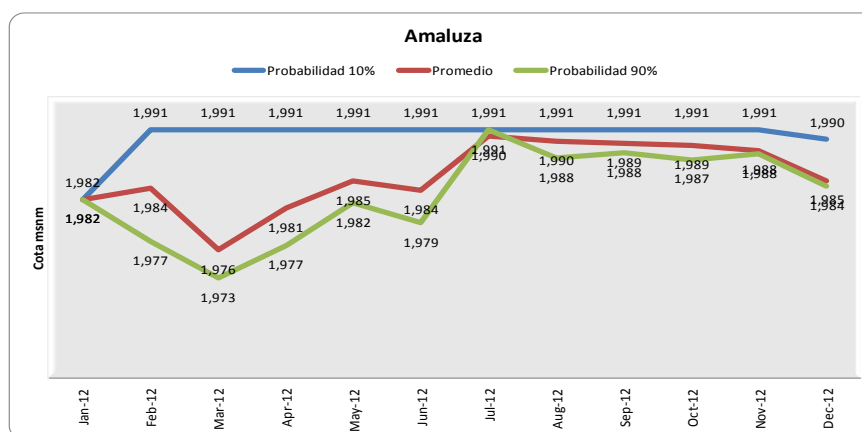


Figura R.121 Trayectoria del embalse de Amaluza periodo enero 2012 – diciembre 2012

### Resultados de prodipa:

Los resultados del algoritmo considerando tres escenarios con probabilidad de excedencia hidrológica del 10%, 90% y promedio de los caudales históricos registrados se presentan a continuación.

### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

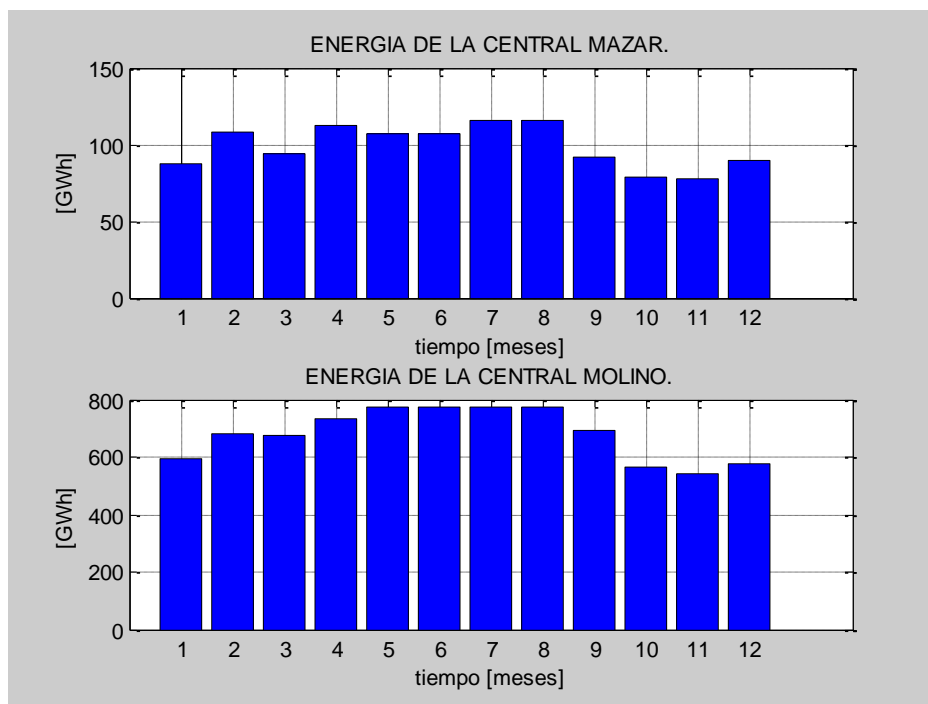


Figura R.122 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

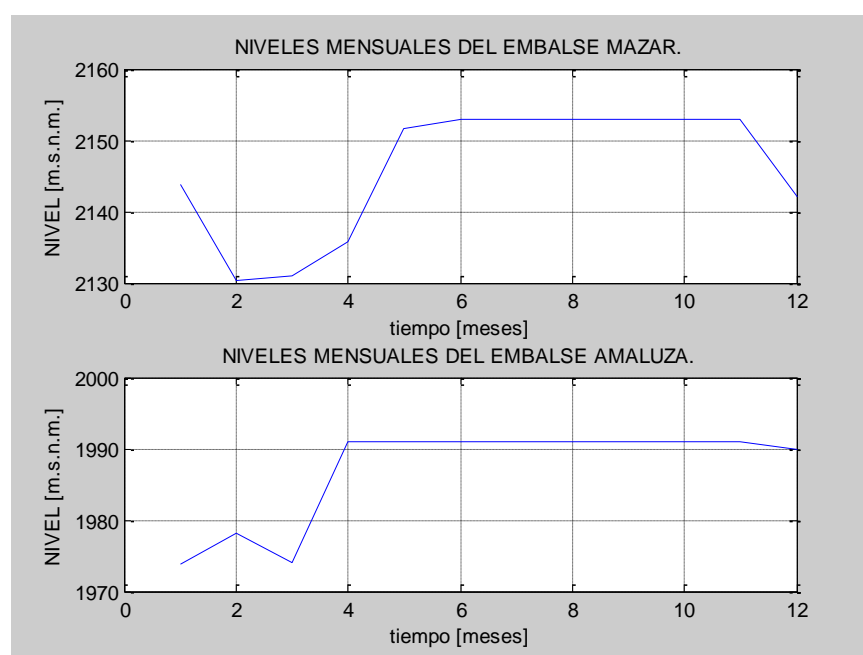


Figura R.123 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

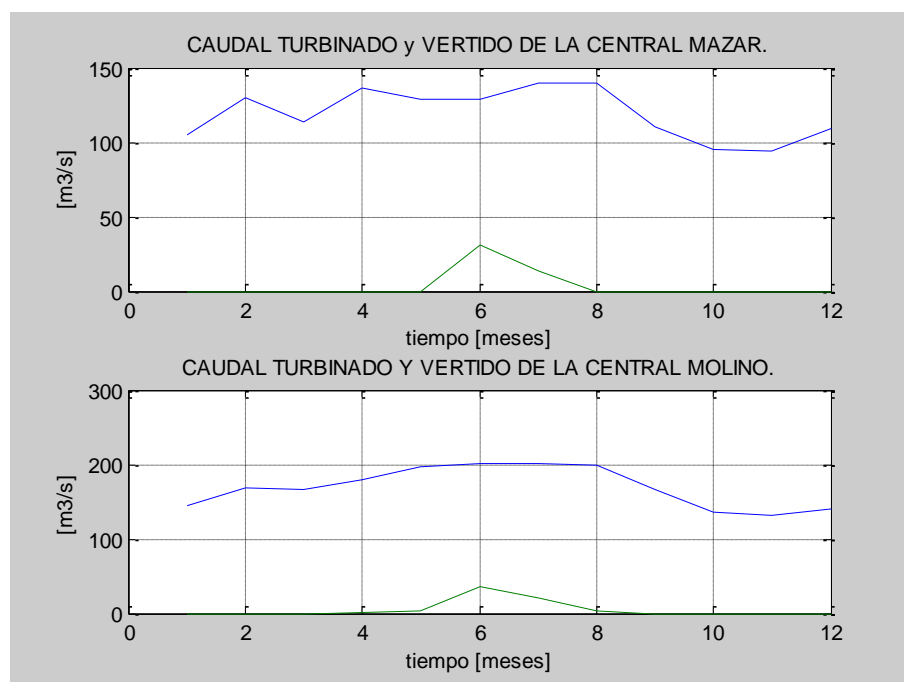


Figura R.124 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla R. 42 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2143.7	2130.4	2131	2135.8	2151.5	2153	2153	2153	2153	2153	2153	2142
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1973.8	1978.1	1974	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1990
Energía Mazar [GWh]	87	107.7	94.3	112.9	107.2	107.2	116.2	115.9	91.7	79.2	77.7	90.2
Energía Molino [GWh]	595	682.9	673.6	733.6	774	774	774	774	692.1	567.5	543.9	579.4
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	104.9	130	113.8	136.3	129.3	129.3	140.2	139.8	110.6	95.6	93.8	108.7
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	145.4	168.2	165.9	178.3	195.8	200.6	201.4	198.3	166.5	136.4	130.8	139.3
Volumen Vertido Mazar [hm³]	0	0	0	0	0	208.1	92.7	0	0	0	0	0
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0	0	0	4.6	15.7	237.3	136.6	16.3	0	0	0	0
Energía Complejo Paute [GWh]	9351.20											

### Hidrología promedio

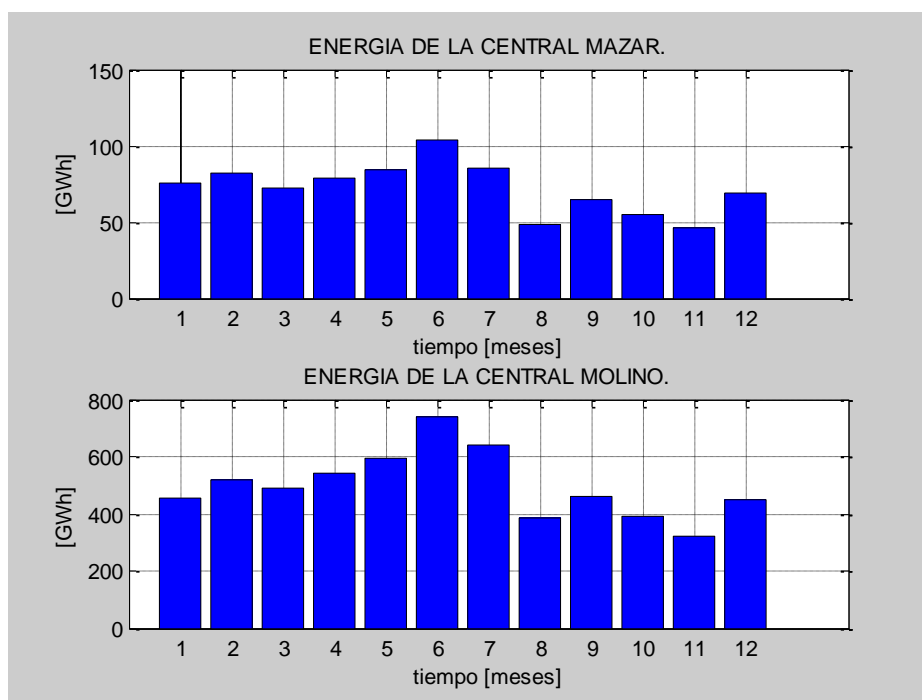


Figura R.125 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

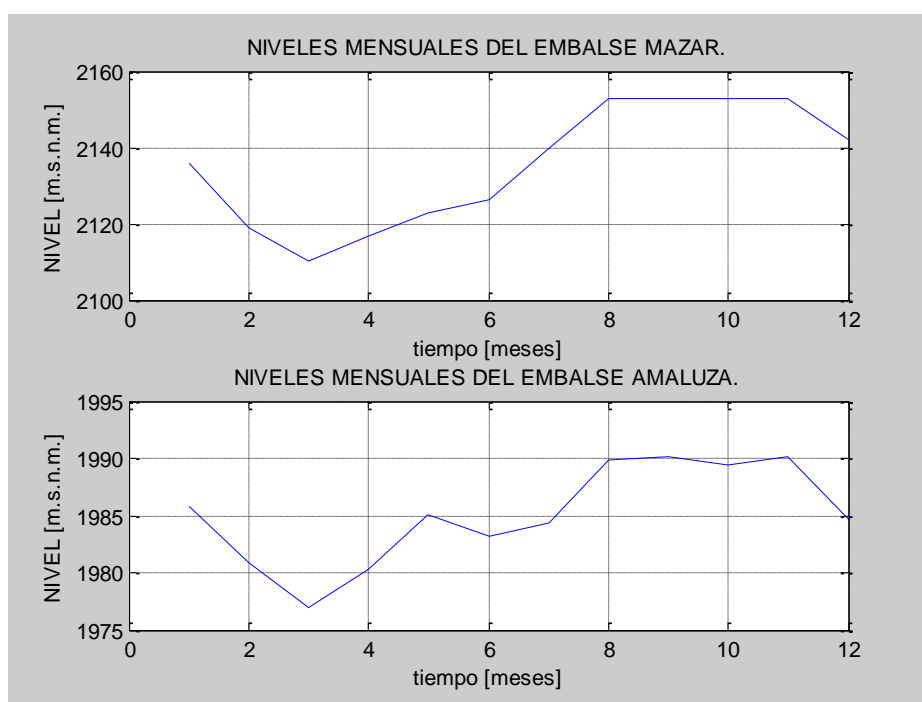


Figura R.126 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

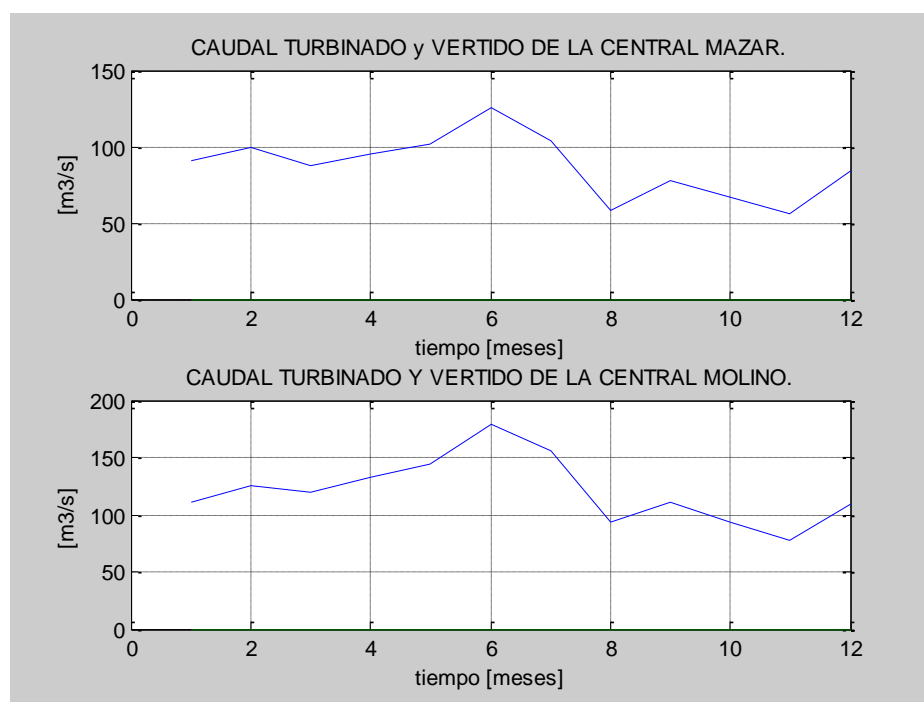


Figura R.127 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla R. 43 Resultados de los embalses centrales proporcionados por prodipa

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2135.80	2118.8	2110.2	2116.7	2122.8	2126.2	2139.6	2153.0	2153.0	2152.9	2153.0	2142.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1985.80	1980.8	1977.0	1980.3	1985.0	1983.1	1984.4	1989.8	1990.2	1989.5	1990.2	1984.70
Energía Mazar [GWh]	75.60	82.10	72.70	78.80	84.30	104.10	85.60	48.20	64.40	55.00	46.70	69.60
Energía Molino [GWh]	457.10	518.40	489.20	541.90	592.90	738.80	643.30	385.80	458.80	389.30	321.20	450.50
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	91.30	99.20	87.90	95.10	101.80	125.70	103.30	58.20	77.70	66.40	56.30	83.90
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	110.70	126.10	119.80	132.80	144.40	179.70	156.40	93.20	110.40	93.70	77.30	108.80
Volumen Vertido Mazar [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	6854.30											

### **Probabilidad del 90 % de excedencia hidrológica**

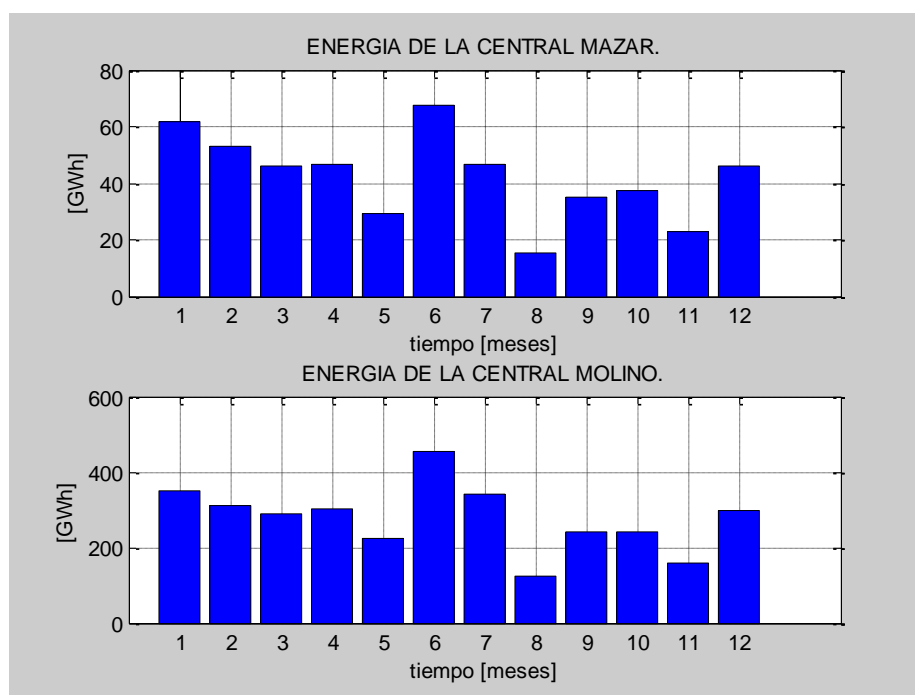


Figura R.128 Producción de energía para la central Molino y central Mazar

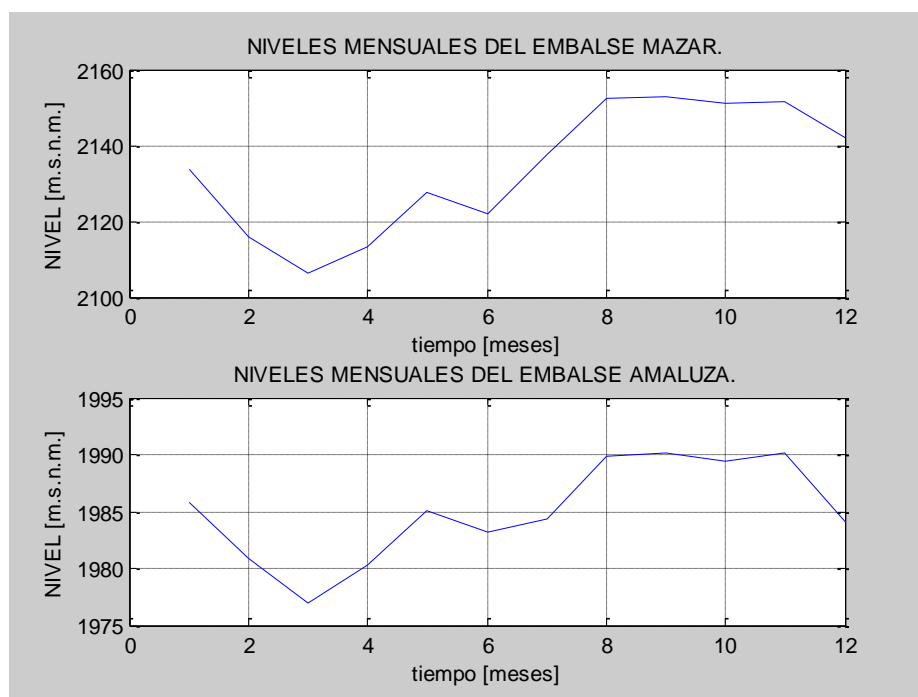


Figura R.129 Niveles mensuales de los embalses Mazar y Amaluza

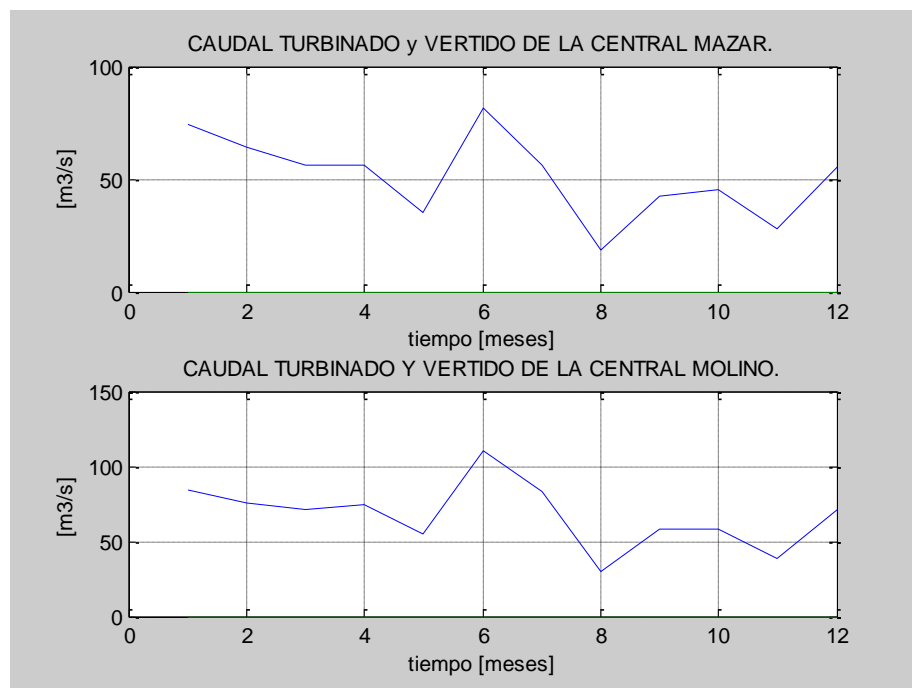


Figura R.130 Caudales de turbinamiento y vertidos de las centrales de Mazar y Molino

Tabla R. 44 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2133.50	2115.7	2106.5	2113.4	2127.6	2121.9	2137.4	2152.3	2153.0	2151.1	2151.7	2142.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1985.80	1980.8	1977.0	1980.3	1985.0	1983.1	1984.4	1989.8	1990.2	1989.5	1990.2	1984.0
Energía Mazar [GWh]	61.70	53.00	46.30	46.40	29.00	67.30	46.80	15.50	35.30	37.30	23.10	45.80
Energía Molino [GWh]	348.50	311.90	290.10	302.20	225.60	452.40	343.40	125.00	241.20	239.70	159.00	296.10
Caudal Turbinado Mazar [m³/s]	74.50	63.90	56.00	56.10	35.00	81.30	56.50	18.60	42.60	45.00	27.80	55.20
Caudal Turbinado Amaluza [m³/s]	84.40	75.80	71.00	74.00	54.90	109.90	83.40	30.20	58.00	57.70	38.30	71.50
Volumen Vertido Mazar [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm³]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	3842.60											



## ANEXO S Simulación del modelo considerando caudales generados en el periodo octubre 2012 – septiembre 2013

### Datos iniciales:

Tabla S. 45 Valores iniciales del embalse Amaluza y del embalse Mazar

Embalse	Nivel inicial m.s.n.m.	Nivel máximo m.s.n.m.
Amaluza (Paute)	1 984,4	1 991,0
Mazar	2150,3	2153,0

Tabla S. 46 Tiempo utilizado para mantenimiento de las unidades de la central Mazar y de la central Molino [Horas]

TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA CENTRAL MAZAR Y MOLINO [horas]												
Unidades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	Sep
U1 Mz	57.0	0.0	0.0	329.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	168.0	105.0	0.0
U2 Mz	57.0	9.5	48.0	281.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	225.0	0.0	0.0
U1	0.0	0.0	0.0	226.0	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0	82.0	0.0	9.5
U2	0.0	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0	82.0	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0
U3	9.5	168.0	682.0	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0	82.0	0.0	9.5	0.0
U4	106.0	120.0	9.5	0.0	9.5	0.0	82.0	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0
U5	226.0	9.5	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0	82.0	0.0	9.5	0.0	9.5
U6	0.0	0.0	0.0	0.0	226.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	82.0	0.0
U7	9.5	0.0	0.0	0.0	226.0	0.0	0.0	9.5	9.5	0.0	82.0	0.0
U8	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	226.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	82.0
U9	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	226.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.0
U10	0.0	82.0	0.0	0.0	9.5	226.0	0.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0

### Resultados del plan anual del CENACE:

A continuación se presentan los resultados brindados por el CENACE dentro del plan anual de operación del sistema nacional interconectado periodo octubre 2012 septiembre 2013

Tabla S. 47 Resultados del embalse y de la central Mazar proporcionados por el plan anual operativo del sistema nacional interconectado SNI

MESES	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
<b>Prodipa 10% nivel</b>	2153.0	2153.0	2153.0	2147.7	2135.0	2139.9	2152.7	2153.0	2153.0	2153.0	2153.0	2153.0
<b>ENERGIA GWh</b>	83.2	73.1	89.9	69.1	94.8	81.5	89.6	110.5	106.6	90.0	101.9	103.3
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	22.8	162.7	288.5	127.6	0.0
<b>Promedio nivel</b>	2152.9	2152.7	2147.9	2136.9	2124.2	2123.1	2137.2	2137.3	2148.1	2152.6	2152.9	2153.0
<b>ENERGIA GWh</b>	60.4	49.3	60.9	66.8	67.4	54.8	57.0	82.0	71.7	78.2	80.9	76.6
<b>Vertimiento</b>	3.0	0.0	0.4	3.2	0.0	0.0	8.5	14.7	33.7	87.0	31.6	3.1
<b>Prodipa 90% nivel</b>	2153.0	2150.4	2143.0	2129.3	2112.5	2103.4	2123.9	2124.4	2140.6	2151.7	2153.0	2153.0
<b>ENERGIA GWh</b>	37.4	29.2	31.0	59.3	41.8	31.6	16.7	56.8	35.1	58.6	41.3	40.7
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla S. 48 Resultados del embalse Amaluza y de la central Molino proporcionados por el plan anual operativo del sistema nacional interconectado SNI

MESES	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
<b>Prodipa 10% nivel</b>	1991.0	1991.0	1991.0	1990.3	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0	1991.0
<b>ENERGIA GWh</b>	581.4	452.1	517.5	503.7	530.5	604.5	655.3	750.4	751.2	779.9	768.8	696.6
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	193.0	203.7	111.7	0.0
<b>Promedio nivel</b>	1990.9	1991.0	1991.0	1983.4	1990.2	1976.1	1980.5	1985.5	1989.8	1991.0	1991.0	1991.0
<b>ENERGIA GWh</b>	400.7	322.9	366.0	435.1	403.1	478.5	489.1	613.4	575.3	656.4	584.9	514.1
<b>Vertimiento</b>	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	9.5	34.5	52.9	20.9	1.0
<b>Prodipa 90% nivel</b>	1991.0	1991.0	1991.0	1982.3	1988.9	1972.5	1976.6	1981.9	1980.6	1991.0	1991.0	1991.0
<b>ENERGIA GWh</b>	264.2	221.0	216.7	351.8	287.5	350.3	233.3	432.9	347.0	452.0	307.2	308.6
<b>vertimiento</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

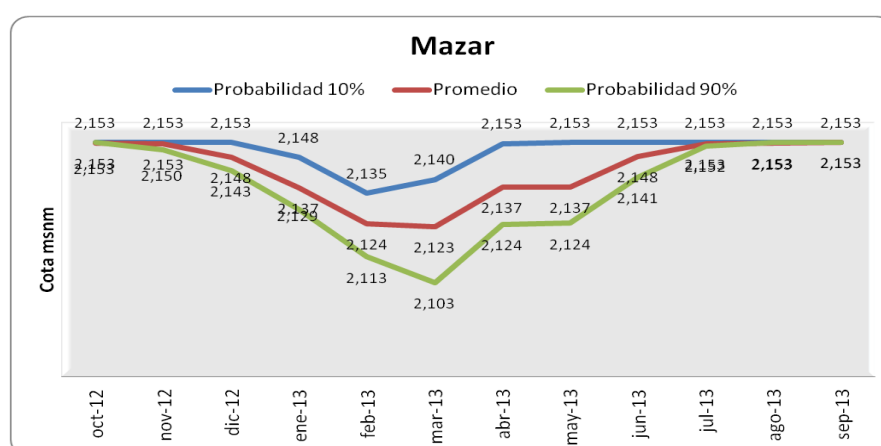


Figura S.131 Niveles del embalse Mazar Plan Anual operativo del CENACE

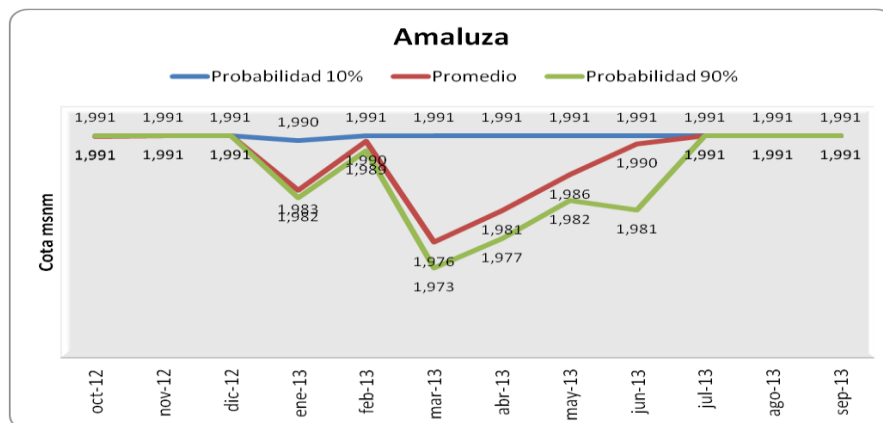


Figura S.132 Niveles del embalse Amaluza Plan Anual operativo del CENACE

### Resultados de prodipa:

En las gráficas y tablas siguientes se presentan los resultados brindados por prodipa cuando se utiliza la interfaz para análisis del modelo del complejo hidroeléctrico Paute cuando se utiliza caudales generados, las variables son los niveles de los embalses, energía producida por la centrales, caudales turbinados por las centrales y caudales vertidos por los embalses, cabe indicar que los escenarios se establecieron de acuerdo a los percentiles 10%, 90% y promedio de los caudales generados los mismos se pueden identificar de acuerdo a los colores azul, rojo y verde respectivamente.

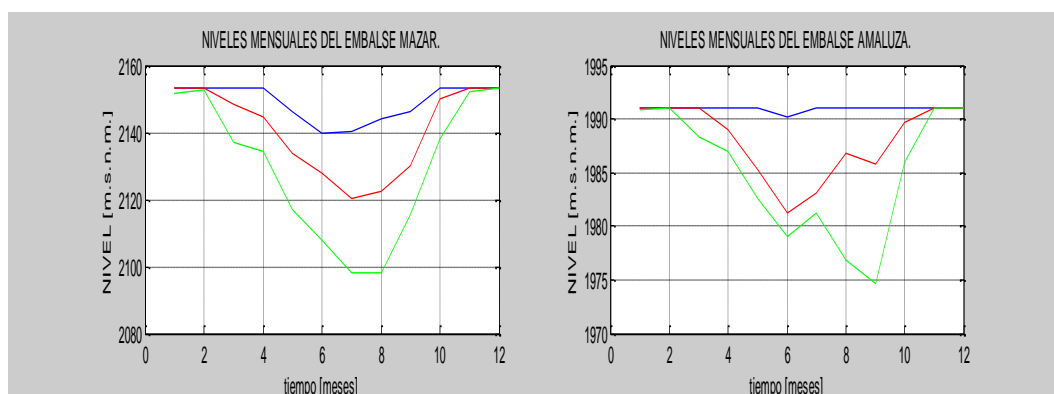


Figura S.133 Niveles de los embalses de Mazar y Amaluza simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013

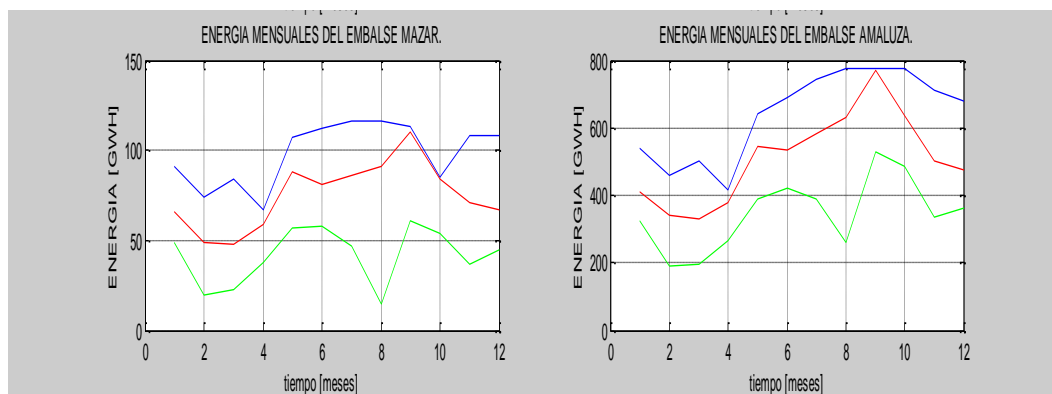


Figura S.134 Producción de Energía de las centrales de Mazar y Molino simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013

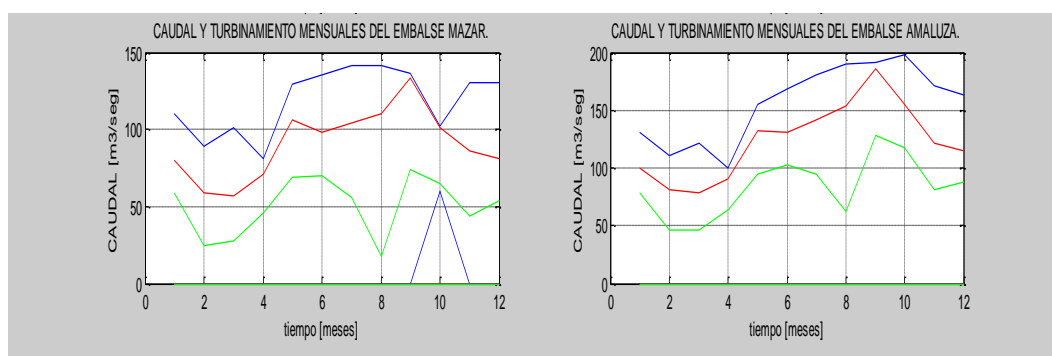


Figura S.135 Caudales de turbinamiento y vertimiento de Mazar y Molino simulación del periodo octubre 2012 septiembre 2013

Los resultados numéricos de la simulación se presentan en las siguientes tablas

### Probabilidad del 10 % de excedencia hidrológica

Tabla S. 49 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología alta

	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2153	2153	2153	2152.4	2141	2139.5	2134.8	2140.9	2151.8	2153	2153	2153
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1991	1991	1991	1991	1991	1989.4	1991	1991	1991	1991	1991	1991
Energía Mazar [GWh]	89.6	59.2	66.9	66.8	86.5	92.2	106.5	116.8	113.1	89.2	99.7	106.8
Energía Molino [GWh]	530.2	388.4	426.6	416	542.2	585.9	685.4	773.3	774	722.5	670.8	673.6
Caudal Turbinado Mazar [m3/s]	108	71.4	80.7	80.6	104.5	111.4	128.7	141.1	136.5	107.7	120.3	128.7
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	128.1	93.3	102.8	100.5	131.4	143.3	166.8	188.4	189.8	178	161.3	161.9
Volumen Vertido Mazar [hm3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62.4	0	0
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía Complejo Paute [GWh]	8282.2											

## Hidrología promedio

Tabla S. 50 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología media

	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2153.0	2153.0	2146.9	2139.7	2123.9	2116.2	2120.1	2127.0	2130.1	2143.3	2153.0	2153.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1991.0	1991.0	1988.9	1987.5	1984.0	1979.9	1982.6	1986.4	1985.4	1986.5	1991.0	1991.0
Energía Mazar [GWh]	61.90	47.90	43.60	53.60	58.70	78.80	65.10	93.80	110.40	84.80	64.40	82.30
Energía Molino [GWh]	392.50	332.30	304.20	347.80	404.50	527.70	476.30	649.10	773.20	643.50	481.10	546.30
Caudal Turbinado Mazar [m3/s]	74.60	57.70	52.60	64.70	70.90	95.20	78.70	113.30	133.40	102.30	77.70	99.20
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	94.80	79.80	73.20	83.80	97.80	128.40	116.40	157.30	186.40	155.50	115.80	131.40
Volumen Vertido Mazar [hm3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	6723.8											

## Probabilidad del 90 % de excedencia hidrológica

Tabla S. 51 Resultados de los embalses y centrales proporcionados por prodipa hidrología baja

	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
Nivel Mazar [m.s.n.m.]	2151.80	2152.5	2141.9	2134.5	2116.6	2107.8	2114.8	2108.4	2118.9	2138.3	2153.0	2153.0
Nivel Amaluza [m.s.n.m.]	1989.60	1990.2	1987.2	1985.8	1981.1	1977.1	1979.7	1979.5	1977.0	1984.4	1990.0	1991.0
Energía Mazar [GWh]	47.10	30.80	29.40	30.00	43.60	54.40	47.90	48.10	60.20	45.60	36.70	54.60
Energía Molino [GWh]	317.90	245.20	231.90	227.10	322.40	402.50	394.00	415.10	522.60	448.20	329.50	412.30
Caudal Turbinado Mazar [m3/s]	56.80	37.20	35.40	36.20	52.60	65.70	57.80	58.10	72.70	55.00	44.30	65.80
Caudal Turbinado Amaluza [m3/s]	76.80	59.00	55.80	54.60	77.80	97.60	95.10	100.70	126.10	108.50	79.60	99.00
Volumen Vertido Mazar [hm3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen Vertido Amaluza [hm3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Energía Complejo Paute [GWh]	4797.1											