

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Estado del Arte . . . . .	3
1.3. Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP) . . . . .	5
1.4. Organización de contenidos . . . . .	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Árboles y Escenarios . . . . .	7
2.2. Principio de no-anticipatividad . . . . .	10
2.3. Formulación extendida . . . . .	11
2.4. Introducción a Progressive Hedging . . . . .	12
2.4.1. Intuición . . . . .	12
2.4.2. Pseudo Código PH . . . . .	14
2.4.3. Caracterización . . . . .	14
2.5. SDDP . . . . .	15
<b>3. Problema eléctrico</b>	<b>18</b>
3.1. Antecedentes y descripción . . . . .	18
3.2. Reducción de sub-problema bloque-etapa . . . . .	21
3.3. Incertidumbre . . . . .	23
3.4. Generación de Escenarios . . . . .	24
3.4.1. Metodologías de generación de escenarios actuales (Generador de escenarios PLP) . . . . .	25
3.4.2. Metodología de generación de escenarios propuesta . . . . .	29
3.4.3. Tratamiento de Data . . . . .	29
3.4.4. Generador de escenarios Synth - NSG . . . . .	30
<b>4. Modelo de optimización</b>	<b>34</b>
4.1. Conjuntos . . . . .	34
4.2. Parámetros . . . . .	35
4.3. Variables . . . . .	36
4.4. Restricciones . . . . .	37
4.5. Función objetivo . . . . .	39
4.6. Rectificaciones del modelo . . . . .	40
<b>5. Algoritmo Progressive Hedging</b>	<b>42</b>
5.1. Pseudo-código extendido . . . . .	42

5.2.	Ajustes y mejoras . . . . .	44
5.2.1.	Aceleración de la resolución de cada subproblema . . . . .	44
5.2.2.	Paralelización del algoritmo . . . . .	45
5.2.3.	Linealizar término cuadrático proximal . . . . .	46
5.2.4.	Ajustes del parámetro $\rho$ de penalización . . . . .	48
5.2.5.	Bundling de escenarios . . . . .	49
5.2.6.	Criterio de término . . . . .	50
<b>6.</b>	<b>Implementación</b>	<b>52</b>
6.1.	Implementación paralela PYSP . . . . .	53
6.2.	Comparación de Metodologías . . . . .	53
6.3.	Recursos computacionales utilizados . . . . .	56
6.4.	Instancias . . . . .	57
<b>7.</b>	<b>Resultados</b>	<b>63</b>
7.1.	Convergencia PH . . . . .	64
7.2.	Cuenca del Laja . . . . .	68
7.2.1.	Árbol Base . . . . .	68
7.3.	Sistema completo (SIC - SING) . . . . .	69
7.3.1.	Caso Uninodal . . . . .	69
7.3.2.	Caso Multinodal . . . . .	70
7.3.3.	Análisis de resultados Árbol Base - Sistema completo (SIC - SING) . . . . .	71
7.4.	Metodologías Generadoras de Escenario . . . . .	72
7.4.1.	Resultados SYNTH . . . . .	73
7.4.2.	Resultados NSG . . . . .	75
7.5.	Comparación de Árbol + Metodología . . . . .	78
7.5.1.	Hidrologías Húmedas . . . . .	80
7.5.2.	Hidrologías Medias . . . . .	82
7.5.3.	Hidrologías Secas . . . . .	83
<b>8.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>86</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>
	<b>Anexos</b>	<b>92</b>
	Anexo A: Pseudo-código Benders Multi etapa . . . . .	92
	Anexo B: Tipo de centrales de generación eléctrica . . . . .	95
	Anexo C: Modelo hidráulico - Cuenca del Laja . . . . .	97
	Anexo D: Resultados de Metodologías de aceleración de resolución de cada subproblema . . . . .	101
	Anexo E: Resultados de la linealización del término cuadrático proximal . . . . .	102
	Anexo F: Estrategias para cálculo de $\rho$ . . . . .	103
	Anexo G: Archivos para paralelización en NLHPC . . . . .	106
	Anexo H: Convergencia de PH . . . . .	108
	Anexo I: Años hidrológicos seleccionados para comparación de metodologías . . . . .	108
	Anexo J: Tiempos de ejecución de lenguajes: Fortran vs Python . . . . .	111

# Índice de Tablas

1.1. Generación eléctrica por tipo de central. Fuente: Comisión nacional de energía CNE [1] . . . . .	2
3.1. Cantidad de escenarios según aperturas y períodos . . . . .	33
6.1. Descripción instancia Cuenca del Laja . . . . .	58
6.2. Parámetros de línea de transmisión - Cuenca del Laja . . . . .	59
6.3. Parámetros de generadores térmicos - Cuenca del Laja . . . . .	59
6.4. Parámetros generadores hidroeléctricos - Cuenca del Laja . . . . .	59
6.5. Características de la demanda - Cuenca del Laja . . . . .	59
6.6. Descripción instancia Uninodal SIC-SING . . . . .	61
6.7. Descripción instancia Multinodal SIC-SING . . . . .	62
7.1. Cuenca del Laja - Árbol base . . . . .	68
7.2. SIC - SING - Caso Uninodal - Árbol Base . . . . .	70
7.3. SIC - SING - Caso Multinodal - Árbol Base . . . . .	70
7.4. Resultados Generador de escenarios SYNTH . . . . .	73
7.5. Resultados Generador de escenarios NSG . . . . .	76
7.6. Tiempos de ejecución árbol + Metodología . . . . .	79
7.7. Tabla resumen escenarios húmedos . . . . .	81
7.8. Tabla resumen escenarios medios . . . . .	83
7.9. Tabla resumen escenarios secos . . . . .	85
A.1. Metodologías de aceleración para cada subproblema . . . . .	101
A.2. Resultados de tramos para $\rho$ . . . . .	102
A.3. Convergencia de PH . . . . .	108
A.4. Años hidrológicos seleccionados . . . . .	109
A.5. Porcentaje de variación de F.O. por escenario . . . . .	110
A.6. Tiempos de las pruebas comparativas en relación a C (menos es mejor, desempeño de $C = 1.0$ ). . . . .	111

# Índice de Ilustraciones

2.1. Largo de períodos vs incertidumbre. . . . .	8
2.2. Árbol de escenario y formulación extendida. . . . .	9
2.3. Representación de principio de no anticipatividad, los nodos encerrados en elipses se denominan conjuntos de información. . . . .	10
3.1. Representación de Red eléctrica y sus nodos. . . . .	19
3.2. Representación de Red hidráulica, con afluentes naturales y sus nodos. . . . .	20
3.3. Representación de la carga en el tiempo (8 días) (a)Potencia demandada en cada instante de tiempo. (b) Cantiada de tiempo que la potencia demandada se encuentra sobre un nivel. . . . .	21
3.4. Representación aproximada por bloques de demanda de la curva de duración de la carga. . . . .	22
3.5. Hidrologías Laja 1960-2013. . . . .	23
3.6. Mínima y máxima hidrología Laja 2007 - 2000. . . . .	24
3.7. Diagrama de escenarios usado en PLP. . . . .	26
3.8. Ejemplo del generador de escenarios que considera todas las posibles combinaciones. . . . .	27
3.9. Ejemplo de escenarios improbables. . . . .	28
3.10. Estimación de distribución. . . . .	31
3.11. Selección de vecinos y estimación de distribución. . . . .	32
3.12. Distribuciones condicional, y elección de puntos dentro de cada segmento. . . . .	32
5.1. Bundling de Escenarios. . . . .	49
5.2. Región de la Formulación extendida compacta. . . . .	50
6.1. Representación teórica del árbol común utilizado, sin aperturas desde el segundo período. . . . .	54
6.2. Red eléctrica instancia Cuenca del Laja. . . . .	58
6.3. Red hidráulica instancia Cuenca del Laja. . . . .	60
7.1. Convergencia de PH, Caso SIC-SING Uninodal, 768 escenarios. . . . .	64
7.2. Variación porcentual de PH por iteración, Caso SIC-SING Uninodal, 768 escenarios. . . . .	65
7.3. F.O por iteración, Caso SIC-SING Uninodal, 768 escenarios. . . . .	66
7.4. Variación porcentual de F.O por iteración, Caso SIC-SING Uninodal, 768 escenarios. . . . .	67

7.5. Tiempos de ejecución Generador de escenarios SYNTH - Formulación extendida (EF), Caso SIC-SING Multinodal . . . . .	74
7.6. Tiempos de ejecución Generador de escenarios SYNTH - Formulación extendida (EF), Caso SIC-SING Multinodal . . . . .	75
7.7. Tiempos de ejecución Generador de escenarios NSG - Formulación extendida (EF), Caso SIC-SING Multinodal . . . . .	77
7.8. Tiempos de ejecución Generador de escenarios NSG - Formulación extendida (EF), Caso SIC-SING Multinodal . . . . .	78
7.9. Histograma de Costos operacionales, escenarios húmedos . . . . .	80
7.10. Variación porcentual de Costos operacionales, escenarios húmedos . . . . .	81
7.11. Histograma de Costos operacionales, escenarios promedio . . . . .	82
7.12. Variación porcentual de Costos operacionales, escenarios promedio . . . . .	82
7.13. Histograma de Costos operacionales, escenarios secos . . . . .	84
7.14. Variación porcentual de Costos operacionales, escenarios secos . . . . .	84
A.1. Representación de Red hidráulica - Cuenca del Laja. . . . .	98
A.2. Modelo hidráulico completo - Cuenca del Laja. . . . .	99
A.3. Modelo hidráulico completo - Cuenca del Laja (continuación). . . . .	100