

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Antecedentes Generales .....	1
1.2	Motivación .....	1
1.3	Objetivos y Alcances .....	2
2	Metodología .....	3
3	Antecedentes .....	4
3.1	Condición Actual .....	4
3.2	Tipos de Turbinas Hidráulicas .....	6
3.3	Altura Neta .....	12
3.4	Pérdidas Hidráulicas .....	13
3.5	Radio Hidráulico ( $R_h$ ) .....	20
3.6	Pérdidas del Tubo de Aspiración .....	20
3.7	Cavitación .....	22
3.8	Caudal, Área y Velocidad .....	23
3.9	Selección de Turbina .....	27
3.10	Mercado Eléctrico .....	35
3.11	Costos .....	40
4	Resultados .....	44
4.1	Casos de Estudio .....	44
4.2	Simplificación de la Ecuación de Bernoulli .....	44
4.3	Pérdida de Carga Antes de la Turbina .....	45
4.4	Pérdida de Carga Después de la Turbina .....	60
4.5	Altura Neta .....	60
4.6	Potencia Disponible .....	61
4.7	Selección de Turbina .....	62
4.8	Proyección de Generación .....	63
4.9	Costos y Tiempo .....	64
4.10	Flujo de Caja .....	66
5	Discusión y Análisis .....	74
6	Conclusiones y Comentarios .....	76
6.1	Conclusiones .....	76
6.2	Comentarios y Recomendaciones .....	77
7	Bibliografía .....	78
	Anexos .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Grupos generadores en el sistema General Carrera.....	5
Tabla 3.2 Coeficiente de rugosidad absoluta $k$ .....	17
Tabla 3.3 Valores del coeficiente $\zeta$ .....	18
Tabla 3.4 Valores del parámetro $m$ para fórmula de Bazin [Ecuación (3.32)].....	26
Tabla 3.5 Valores del parámetro $n$ y $1/n$ para fórmula de Kutter [Ecuación (3.33)] y de Manning [Ecuación (3.34)]. .....	26
Tabla 3.6 Proyección de energía y demanda máxima, sistema General Carrera. ....	39
Tabla 3.7 Desglose mensual de generación por tipo, sistema General Carrera.....	39
Tabla 3.8 Desglose de costos de O&M, sistema General Carrera. ....	40
Tabla 3.9 Valores promedio de instalación de equipos en central.....	41
Tabla 3.10 Desglose de gastos por central. ....	41
Tabla 4.1 Datos de la división de secciones del primer tramo. ....	46
Tabla 4.2 Valores de pérdidas primarias en primer tramo. ....	46
Tabla 4.3 Resumen de pérdidas en canal de aducción. ....	47
Tabla 4.4 Datos de la división de secciones del segundo tramo, caso 1. ....	49
Tabla 4.5 Valores de coeficiente de rugosidad relativa por tramo, caso 1. ....	49
Tabla 4.6 Valores de coeficiente de pérdida de carga primaria por tramo, caso 1. ....	49
Tabla 4.7 Valores de caudal, área y velocidad por tramo, caso 1.....	49
Tabla 4.8 Valores de pérdidas primarias por tramo, caso 1.....	50
Tabla 4.9 Resumen de pérdidas de carga antes de la turbina, caso 1.....	52
Tabla 4.10 Datos de la división de secciones del segundo tramo, caso 2.....	53
Tabla 4.11 Valores de coeficiente de rugosidad relativa por tramo, caso 2. ....	53
Tabla 4.12 Valores de coeficiente de pérdida de carga primaria por tramo, caso 2.....	53
Tabla 4.13 Valores de caudal, área y velocidad por tramo, caso 2. ....	54
Tabla 4.14 Valores de pérdidas primarias por tramo, caso 2.....	54
Tabla 4.15 Resumen de pérdidas de carga antes de la turbina, caso 2.....	55
Tabla 4.16 Datos de la división de secciones del segundo tramo, caso 3.....	56
Tabla 4.17 Valores de coeficiente de rugosidad relativa por tramo, caso 3. ....	57
Tabla 4.18 Valores de coeficiente de pérdida de carga primaria por tramo, caso 3.....	57
Tabla 4.19 Valores de caudal, área y velocidad por tramo, caso 3. ....	57
Tabla 4.20 Valores de pérdidas primarias por tramo, caso 3.....	58
Tabla 4.21 Resumen de pérdidas de carga antes de la turbina, caso 3.....	59
Tabla 4.22 Resumen de pérdidas antes de la turbina, por casos. ....	59
Tabla 4.23 Valores de potencia unitaria por caso. ....	60
Tabla 4.24 Valores de velocidad de rotación por caso (A, para ajustado). ....	60
Tabla 4.25 Valores de pérdida de carga después de la turbina, por caso. ....	60
Tabla 4.26 Valores para el cálculo de altura bruta.....	61
Tabla 4.27 Resumen de pérdidas exteriores a la turbina, por casos.....	61
Tabla 4.28 Valores de altura neta, por caso.....	61
Tabla 4.29 Valores de potencia disponible, por caso.....	62
Tabla 4.30 Resultados de geometría de turbinas según casos. ....	62
Tabla 4.31 Resultados de cinemática de turbinas según casos. ....	62
Tabla 4.32 Resultados de triángulos de velocidades en turbinas según casos.....	63

Tabla 4.33 Proyección de generación de energía en el sistema General Carrera. ....	63
Tabla 4.34 Proyecciones de ingreso por venta de energía hasta el año 2037. ....	64
Tabla 4.35 Valores totales de unidades generadoras.....	64
Tabla 4.36 Valores de ítems atinentes al proyecto.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología del trabajo de título. ....	3
Figura 3.1 Mapa de la zona descrita. Cerca del círculo anaranjado se encuentra la central El Traro, cerca del círculo violeta se encuentra la central Chile Chico. ....	4
Figura 3.2 Esquema del diagrama unilineal del sistema General Carrera.....	5
Figura 3.3 Diagrama "Tipo de turbomáquinas hidráulicas". ....	6
Figura 3.4 Esquema de una turbina Kaplan.....	7
Figura 3.5 Tipos de turbinas hidráulicas. ....	8
Figura 3.6 Corte meridional de una turbina Francis. ....	9
Figura 3.7 Esquema de una turbina Kaplan.....	10
Figura 3.8 Esquema de una turbina Pelton.....	11
Figura 3.9 Esquema de una turbina con los puntos A (nivel superior de agua), E (entrada de turbina), S (salida de turbina) y Z (nivel inferior de agua).....	12
Figura 3.10 Distintas geometrías de conductos abiertos. ....	14
Figura 3.11 Flujo uniforme en un conducto abierto.....	15
Figura 3.12 Configuración de codos en canal ....	18
Figura 3.13 Representación de la bifurcación del canal.....	18
Figura 3.14 Coeficientes de pérdidas de carga para válvula completamente abierta en función del espesor del obturador. ....	19
Figura 3.15 Esquema de tubo de aspiración de una turbina. ....	21
Figura 3.16 Representación de sección transversal A, medidas en centímetros.....	24
Figura 3.17 Representación de sección transversal B, medidas en centímetros.. ....	24
Figura 3.18 Valor del coeficiente de velocidad en función de la velocidad específica en una turbina Kaplan.....	28
Figura 3.19 Dimensiones principales de una turbina Kaplan. ....	29
Figura 3.20 Relación entre $D_c$ y $D$ en función de la altura neta.....	30
Figura 3.21 Relación entre $B$ y $D$ en función de la velocidad específica.....	30
Figura 3.22 Número de álabes en función de la altura neta.....	31
Figura 3.23 Coeficiente de cavitación en función de la velocidad específica ....	32
Figura 3.24 Representación de las velocidades al borde del álabe ....	32
Figura 3.25 Esquema de las velocidades en el rotor ....	33
Figura 3.26 Diagrama del mercado eléctrico.....	35
Figura 3.27 División del sistema de transmisión de Chile. ....	37
Figura 3.29 Regresión de costos unitarios en unidades hidráulicas.....	42
Figura 3.30 Regresión de costos unitarios en unidades térmicas.....	42
Figura 4.1 Esquema de la central hidráulica, por tramos ....	45
Figura 4.2 Esquema del canal de aducción ....	46
Figura 4.3 Esquema de la tubería de presión.....	48
Figura 4.4 Esquema tentativo de la tubería de presión, caso 2.....	52

Figura 4.5 Esquema tentativo de la tubería de presión, caso 3.....	56
Figura 4.6 Comparación de VAN por caso, sin crédito .....	67
Figura 4.7 Comparación de VAN por caso, crédito del 30% .....	67
Figura 4.8 Comparación de VAN por caso, crédito del 50% .....	68
Figura 4.9 Comparación de VAN por caso, crédito del 70% .....	68
Figura 4.10 Comparación de VAN por caso, crédito del 100% .....	69
Figura 4.11 Comparación de TIR por caso, sin crédito.....	69
Figura 4.12 Comparación de TIR por caso, crédito del 30% .....	70
Figura 4.13 Comparación de TIR por caso, crédito del 50% .....	70
Figura 4.14 Comparación de TIR por caso, crédito del 70% .....	71
Figura 4.15 Comparación de TIR por caso, crédito del 100% .....	71
Figura 4.16 VAN versus cantidad de crédito, caso 2.....	72
Figura 4.17 TIR versus cantidad de crédito, caso 2 .....	72
Figura 4.18 <i>Payback</i> versus cantidad de crédito, caso 2 .....	73