

## Índice

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Lugar de aplicación</b> .....	2
<b>1.1.1 Definición de Minicentrales</b> .....	4
<b>1.1.2 Minicentrales de Pasada como energía renovable no convencional</b> .....	7
<b>1.2 Problemática</b> .....	10
<b>1.3 Objetivo general</b> .....	11
<b>1.4 Objetivos específicos</b> .....	11
<b>1.5 Resultados tangibles esperados</b> .....	12
<b>1.6 Áreas de investigación</b> .....	13
<b>1.7 Resumen de metodología</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	16
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1 Generalidades</b> .....	17
<b>2.2 Descripción de un modelo</b> .....	17
<b>2.2.1 Modelo numérico</b> .....	17
<b>2.2.2 Etapas de un modelo numérico</b> .....	18
<b>2.3 Definición fluido</b> .....	20
<b>2.3.1 Propiedades de un fluido</b> .....	20
<b>2.3.1.1 Densidad</b> .....	20
<b>2.3.2 Presión</b> .....	20
<b>2.3.2.1 Presión hidrostática</b> .....	21
<b>2.3.2.2 Presión atmosférica</b> .....	21
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	22
<b>COMPONENTES DE UNA MINICENTRAL</b> .....	22
<b>3.1 Generalidades</b> .....	23
<b>3.2 Obras civiles</b> .....	26
<b>3.2.1 Obras de captación</b> .....	26
<b>3.2.1.1 Bocatomas</b> .....	26
<b>3.2.1.2 Desarenador</b> .....	31
<b>3.2.2 Canal de aducción</b> .....	34
<b>3.2.2.1 Aliviaderos</b> .....	36
<b>3.2.3 Cámara de carga</b> .....	38
<b>3.2.4 Tubería de presión</b> .....	41
<b>3.2.4.1 Válvulas para tuberías de presión</b> .....	46
<b>3.2.4.2 Apoyos y anclajes para Tuberías de presión</b> .....	47
<b>3.2.5 Casa de máquinas</b> .....	49
<b>3.2.6 Canal de salida</b> .....	52
<b>3.3 Equipamiento electromecánico</b> .....	52
<b>3.3.1 Turbinas</b> .....	52
<b>3.3.1.1 Turbinas Pelton</b> .....	55
<b>3.3.1.2 Turbinas Francis</b> .....	57
<b>3.3.1.3 Tuberías Kaplan</b> .....	59
<b>3.3.2 Generadores</b> .....	61
<b>3.3.3 Transformadores</b> .....	63

3.3.4	Sistemas y equipos anexos y auxiliares .....	63
3.3.5	Dispositivos y equipos mecánicos .....	65
3.3.6	Línea de Transmisión .....	65
<b>CAPÍTULO 4</b>	.....	67
<b>DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES</b>	.....	67
<b>4.1</b>	<b>Generalidades</b> .....	68
<b>4.2</b>	<b>Canal de aducción</b> .....	70
<b>4.2.1</b>	<b>Canal abierto</b> .....	70
<b>4.2.1.1</b>	<b>Nomenclatura utilizada en el diseño de Canales abiertos</b> .....	71
<b>4.2.1.2</b>	<b>Pasos a seguir para el cálculo</b> .....	74
<b>4.2.2</b>	<b>Canal de aducción cerrado o Tubería de aducción</b> .....	77
<b>4.2.2.1</b>	<b>Formula de Manning para la velocidad de escurrimiento</b> .....	77
<b>4.2.2.2</b>	<b>Para Tuberías con sección llena</b> .....	77
<b>4.2.2.3</b>	<b>Tuberías con sección parcialmente llena</b> .....	78
<b>4.3</b>	<b>Tubería de presión</b> .....	79
<b>4.4</b>	<b>Turbinas</b> .....	82
<b>CAPÍTULO 5</b>	.....	86
<b>PARÁMETROS DE GENERACIÓN</b>	.....	86
<b>5.1</b>	<b>Energía a partir del agua</b> .....	87
<b>5.1.1</b>	<b>Salto</b> .....	87
<b>5.1.2</b>	<b>Caudal de equipamiento</b> .....	88
<b>5.1.3</b>	<b>Cálculo de la potencia</b> .....	89
<b>5.2</b>	<b>Ingresos de una Minicentral</b> .....	92
<b>5.2.1</b>	<b>Venta de energía</b> .....	92
<b>5.2.2</b>	<b>Venta de Potencia firme</b> .....	92
<b>5.2.3</b>	<b>Precios del mercado eléctrico</b> .....	93
<b>5.2.4</b>	<b>Venta de Bonos de carbono</b> .....	95
<b>CAPITULO 6</b>	.....	97
<b>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO</b>	.....	97
<b>6.1</b>	<b>Generalidades del modelo</b> .....	98
<b>6.2</b>	<b>Dimensionamiento del Canal de aducción</b> .....	99
<b>6.2.1</b>	<b>Tablas de parámetros</b> .....	100
<b>6.2.2</b>	<b>Dimensiones Canal</b> .....	102
<b>6.2.3</b>	<b>Generación en función de la velocidad del Canal</b> .....	107
<b>6.2.4</b>	<b>Costos totales Canal</b> .....	114
<b>6.2.5</b>	<b>Tubería de aducción</b> .....	117
<b>6.3</b>	<b>Dimensionamiento de la Tubería de presión</b> .....	121
<b>6.4</b>	<b>Seleccionamiento de la Turbina</b> .....	134
<b>6.5</b>	<b>Estimación de la generación</b> .....	144
<b>6.6</b>	<b>Estimación de los ingresos</b> .....	150
<b>CAPÍTULO 7</b>	.....	156
<b>CONCLUSIONES</b>	.....	156
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	.....	159
<b>ANEXOS</b>	.....	161

## Índice de figuras

<b>Figura 1: Sistemas eléctricos en Chile .....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2: Sistema representativo de recorrido eléctrico Chileno .....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 3: Transformación de energía hidráulica en energía eléctrica .....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 4: Esquema de una Minicentral Hidroeléctrica de Pasada .....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 5: Esquema de una Minicentral Hidroeléctrica a pie de presa .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 6: Componentes de una Minicentral de Pasada .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7: Minicentral de canal de caída pequeña .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 8: Minicentral sin canal de gran caída .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 9: Minicentral con canal de gran caída .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 10: Ubicación de la bocatoma .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 11: Esquema de una bocatoma .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 12: Esquema de un desarenador .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 13: Esquema transversal de una desarenador .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 14: Dimensiones de un canal de aducción .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 15: Estructura de un aliviadero .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 16: Esquema de una cámara de carga .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 17: Esquema de una cámara de carga vista de planta .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 18: Componentes de una tubería de presión .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 19: Junta de expansión para tubería de presión .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 20: Válvulas de mariposa con diferentes mecanismos de apertura y cierre .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 21: Apoyos y anclajes para tuberías de presión .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 22: Turbina Pelton .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 23: Turbina Francis .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 24: Turbina Kaplan .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 25: Eficiencia típicas del sistema para Minicentral operando a plena carga ...</b>	<b>69</b>
<b>Figura 26: Nomenclatura del canal de aducción .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 27: Perímetro mojado .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 28: Angulo al interior de la tubería .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 29: Calculo de la presión estática en función de la altura bruta .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 30: Diagrama de equipo generado para turbinas de acción y reacción .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 31: Esquema representativo de salto de agua .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 32: Menú inicial del modelo .....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 33: Selección opción canal de aducción .....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 34: Selección opción tablas de parámetros para canal de aducción .....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 35: Tablas de parámetros para canal de aducción .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 36: Selección opción dimensiones canal para canal de aducción .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 37: Dimensiones del canal de aducción .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 38: Componentes de canal de aducción .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 39: Ingreso de constantes a modelo para estimar dimensiones del canal .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 40: Entrega de las dimensiones del canal a través del modelo .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 41: Selección opción generación velocidad para canal de aducción .....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 42: Generación bruta sin pérdida de altura por canal .....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 43: Generación eléctrica con pérdida de altura .....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 44: Proyección de precios en la utilización del modelo .....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 45: Ingreso de constantes en la opción generación-velocidad para el canal ...</b>	<b>111</b>

<b>Figura 46:</b>	<b>Generación entregada por el modelo sin pérdidas del canal .....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 47:</b>	<b>Generación proporcionada por el modelo con pérdidas del canal.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 48:</b>	<b>Ingreso de la proyección de precios de la energía eléctrica al modelo.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 49:</b>	<b>Selección opción costos totales canal para canal de aducción .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 50:</b>	<b>Costo total de las pérdidas en canal de aducción.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 51:</b>	<b>Entrega de dimensiones finales del canal a través del modelo .....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 52:</b>	<b>Selección opción tubería de aducción .....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 53:</b>	<b>Distintas velocidades en función del tirante .....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 54:</b>	<b>Costos de las distintas pérdidas en función de la pendiente .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 55:</b>	<b>Selección opción tubería de presión .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 56:</b>	<b>Menú para la opción tubería de presión.....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 57:</b>	<b>Valores dimensionamiento de tubería de presión a través del modelo.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 58:</b>	<b>Calculo de espesores y pérdidas de altura en cada tramo de tubería.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 59:</b>	<b>Calculo de costo en pérdida de generación y material para tubería.....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 60:</b>	<b>Selección opción costo de pérdidas en la generación para tubería .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 61:</b>	<b>Escenario base sin pérdidas en tubería de presión .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 62:</b>	<b>Calculo de pérdidas para cada tramo de tuberías.....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 63:</b>	<b>Ingreso y extracción de valores iniciales para tubería de presión.....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 64:</b>	<b>Entrega de costos y pérdidas totales para la tubería.....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 65:</b>	<b>Calculo valores necesarios para estimar pérdida por tramo de tubería ..</b>	<b>130</b>
<b>Figura 66:</b>	<b>Calculo de pérdida por tramo de tubería.....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 67:</b>	<b>Espesores calculados para cada tramo de tubería.....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 68:</b>	<b>Escenario base de generación sin pérdidas en los ramos de tubería.....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 69:</b>	<b>Calculo de generación eléctrica con pérdidas en tramo 1.....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 70:</b>	<b>Calculo de costos por pérdidas y material construcción para la tubería .</b>	<b>133</b>
<b>Figura 71:</b>	<b>Selección opción turbina para el seleccionamiento de turbina.....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 72:</b>	<b>Selección opción seleccionamiento turbina para turbina hidráulica .....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 73:</b>	<b>Seleccionamiento de turbina hidráulica .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 74:</b>	<b>Utilización del ábaco a través del modelo para seleccionar turbina .....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 75:</b>	<b>Calculo de la velocidad específica para cada tipo de turbina .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 76:</b>	<b>Diagrama para selección de turbina en función de velocidad específica.</b>	<b>139</b>
<b>Figura 77:</b>	<b>Selección preliminar de la turbina a través del modelo .....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 78:</b>	<b>Abaco utilizado para el seleccionamiento de turbina.....</b>	<b>141</b>
<b>Figura 79:</b>	<b>Calculo de velocidades específicas a través del modelo.....</b>	<b>142</b>
<b>Figura 80:</b>	<b>Diagrama proporcionado por el modelo de selección del tipo de turbina</b>	<b>143</b>
<b>Figura 81:</b>	<b>Selección opción generación .....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 82:</b>	<b>Estimación de la generación anual de la Minicentral .....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 83:</b>	<b>Estimación de la potencia firme y CERs de la Minicentral .....</b>	<b>147</b>
<b>Figura 84:</b>	<b>Constantes iniciales para determinar la generación real.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 85:</b>	<b>Valores extraídos por el modelo para calculo de generación .....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 86:</b>	<b>Valores proporcionados por el modelo para calculo de generación .....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 87:</b>	<b>Generación total entregada por el modelo .....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 88:</b>	<b>Selección opción generación .....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 89:</b>	<b>Constantes iniciales para estimar la proyección de ingresos.....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 90:</b>	<b>Ingresos entregados por el modelo.....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 91:</b>	<b>Ingresos proyectados por el modelo.....</b>	<b>153</b>

<b>Figura 92: Ingreso de precios y constantes para calculo de futuros ingresos.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 93: Entrega de ingresos anuales a través del modelo.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 94: Entrega de ingresos proyectados a través del modelo.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 95: Entrega de ingresos proyectados anuales a través del modelo.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 96: Secuencia de utilización del modelo.....</b>	<b>155</b>

## **Índice de tablas**

<b>Tabla 1: Tamaño máximo de las partículas que pueden llegar a la turbina.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 2: Espaciamiento de barrotes en cámara de carga.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 3: Sección transversal mínima de una cámara de carga.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 4: Pauta generales para seleccionar una tubería de presión.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 5: Espaciamiento de pilares utilizados en tubería de presión.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 6: Porcentajes de costos de un proyecto constructivo de Minicentral.....</b>	<b>68</b>