

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS.....	5
1.6. RESULTADOS ESPERADOS.....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. ENERGÍA HIDROELECTRICA.....	12
2.2. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	13
2.2.1. Tipos de central hidroeléctrica.....	13
2.2.1.1. Centrales de embalse.....	13
2.2.1.2. Centrales de pasada.....	14
2.2.1.3. Centrales de bombeo.....	14

2.2.2.	Centrales según potencia generada.....	15
2.3.	RUEDA HIDRÁULICA	16
2.3.1.	Antecedentes históricos	16
2.3.2.	Tipos de rueda hidráulica	17
2.3.2.1.	Rueda hidráulica de admisión superior (Overshot)	18
2.3.2.2.	Rueda hidráulica de alimentación lateral (Breastshot)	18
2.3.2.3.	Rueda hidráulica de alimentación inferior (Undershot).....	19
2.4.	FLUJO SOBRE CANALES ABIERTOS	21
2.4.1.	Número de Reynolds para flujo en canales abiertos	21
2.4.2.	Número de Froude	21
2.4.3.	Profundidad hidráulica	22
2.4.4.	Velocidad promedio	22
2.4.5.	Radio hidráulico	23
2.4.6.	Flujo volumétrico o descarga	25
2.5.	TEORÍA DE LAS TURBOMÁQUINAS	25
2.5.1.	Teorema de impulso hidráulico	25
2.5.2.	Ecuación de Euler	29
2.6.	DISEÑO DE LA RUEDA HIDRÁULICA	31
2.6.1.	Ancho de la pala	31
2.6.2.	Longitud de la pala	31
2.6.3.	Ángulo de ataque de la pala.....	31
2.6.4.	Fuerza sobre los álabes.....	32
2.6.5.	Potencia de una rueda hidráulica de paso.....	33
2.6.5.1.	Potencia optima de una rueda hidráulica de paso	34
2.6.5.2.	Rendimiento de una rueda hidráulica	34

2.7.	ELEMENTOS MECÁNICOS PARA LA RUEDA HIDRÁULICA	35
2.7.1.	Diámetro de eje.....	35
2.7.1.1.	Eje sólido	35
2.7.1.2.	Eje hueco.....	36
2.7.2.	Falla por fatiga.....	36
2.7.2.1.	Límite de resistencia a la fatiga	36
2.7.2.2.	Límite de resistencia a la fatiga corregido (Ecuación de Marin)	37
2.7.2.3.	Factor de modificación de la condición superficial	38
2.7.2.4.	Factor de modificación de tamaño.....	38
2.7.2.5.	Factor de modificación de carga.....	39
2.7.2.6.	Factor de modificación de temperatura	39
2.7.2.7.	Factor de confiabilidad	40
2.7.2.8.	Factor de modificación de efectos varios	41
2.7.2.9.	Vida del eje	43
2.7.2.10.	Resistencia a la fatiga.....	43
2.7.3.	Selección de Rodamientos.....	44
CAPÍTULO 3.	DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA	45
3.1.	METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	46
3.1.1.	Variables libres y parámetros conocidos	46
3.1.2.	Geometría de los álabes	47
3.1.3.	Diseño 3D de la rueda hidráulica y plataforma	48
3.1.3.1.	Propuesta de diseño rueda hidráulica.....	48
3.1.3.1.1.	Rueda hidráulica de palas planas	48
3.1.3.1.2.	Rueda hidráulica de palas curvas	49
3.1.3.2.	Plataforma de montaje	50

3.1.3.3.	Rampa de cauce	51
3.2.	DISEÑO HIDRÁULICO.....	51
3.2.1.	Fuerza ejercida sobre los álabes	51
3.2.2.	Potencia máxima teórica de la máquina	52
3.2.3.	Potencia hidráulica teórica.....	53
3.2.4.	Rendimiento de la máquina	54
3.3.	DISEÑO MECÁNICO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA RUEDA HIDRÁULICA.	55
3.3.1.	Material de construcción	55
3.3.2.	Espesor de los álabes	56
3.3.2.1.	Malla.	56
3.3.2.2.	Condiciones de borde.....	56
3.3.2.3.	Resumen de la simulación	58
3.3.3.	Diseño del eje	59
3.3.4.	Selección de rodamientos	60
CAPÍTULO 4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1.	Generación eléctrica	63
4.1.1.	Selección del generador eléctrico.....	64
4.1.2.	Capacidad de alimentación de electrodomésticos	65
4.2.	diseño final del equipo.....	67
4.2.1.	Álabes de la rueda hidráulica.....	67
4.2.2.	Rueda de paletas o corona	68
4.2.3.	Plataforma de montaje la rueda hidráulica	69
4.2.4.	Rampa de cauce	72
4.2.5.	Eje de transmisión	73

4.2.6.	Ensamblaje del conjunto.....	73
4.2.7.	Bocetos de fabricación.....	74
4.2.7.1.	Plataforma (2 piezas)	74
4.2.7.2.	Corona.....	75
4.2.7.3.	Álabes de la rueda.....	76
4.2.7.4.	Eje de transmisión.....	76
4.2.7.5.	Rampa de cauce	77
4.2.7.6.	Boceto del conjunto.	77
4.2.7.7.	Esquema de pintura.....	78
4.2.8.	Sistema de levante	79
4.3.	Curvas de trabajo	80
4.3.1.	Rangos de potencia en función del caudal del canal.	80
4.3.2.	Curva de fuerza hidráulica ejercida sobre la rueda.....	81
4.3.2.1.	Curva potencia vs velocidad de la rueda hidráulica.....	82
4.3.3.	Curva de rendimiento.	82
4.4.	Cotizaciones	84
4.4.1.	Costos de importación del generador eléctrico.....	84
4.4.2.	Materiales de fabricación.....	85
4.4.3.	Elementos mecánicos	86
4.4.4.	Servicios de fabricación.....	87
4.4.5.	Presupuesto necesario.....	87
	CONCLUSIONES.....	88
	REFERENCIAS	93
	ANEXO 1: MARCO PARTIDOR DEL CANAL LA FLORIDA.	96
	ANEXO 2: MEMORIA DE CÁLCULO.	97

ANEXO 3: DESARROLLO MATEMÁTICO DE LAS ECUACIONES.	102
ANEXO 4: BOCETOS DE FABRICACIÓN.	103
ANEXO 5: SELECCIÓN DE RODAMIENTO SKF.	111
ANEXO 6: COTIZACIÓN COMPONENTES Y MATERIALES.	112
ANEXO 7: COTIZACIÓN SERVICIO DE FABRICACIÓN EN MAESTRANZA.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: hidroeléctrica de embalse angostura [7].	13
Figura 2-2: Central de pasada San Clemente [8].	14
Figura 2-3: Ruedas de agua de 32 kW en el Canavese canal, Turín. Italia [1].	17
Figura 2-4: Rueda hidráulica gravitatoria pura [10].	18
Figura 2-5: Rueda hidráulica de alimentación lateral [10].	19
Figura 2-6: Rueda hidráulica de impulsión inferior [10].	20
Figura 2-7: Rueda hidráulica de paso [10].	20
Figura 2-8: Geometrías típicas para canales abiertos y alcantarillas [12].	24
Figura 2-9: Impulso sobre un sistema en ejes coordenados [14].	27
Figura 2-10: Intercambio de momentum entre un chorro de fluido y un álabe [13].	28
Figura 2-11: Rodete de una bomba centrifuga: (a) corte meridional, (b) corte transversal (con dibujo de los triángulos de velocidad a la entrada y a la salida) [13].	29
Figura 2-12: representación gráfica el triángulo de velocidades.	29
Figura 2-13: Ángulo de ataque del álabe de una rueda hidráulica [15].	32
Figura 2-14: Sensibilidad a la muesca para el caso de aceros y aleaciones de aluminio [21].	42
Figura 2-15: eje redondo con filete en el hombro en flexión [21].	43
Figura 3-1: Boceto de álabes planos con el ángulo de ataque requerido.	47
Figura 3-2: Boceto de álabe hidrodinámico con el ángulo de ataque requerido.	47
Figura 3-3: Diseño de rueda hidráulica de palas planas.	48
Figura 3-4: Rueda de agua de alabes curvos (Rueda de Poncelet).	49
Figura 3-5: Opción de plataforma de montaje cuadrada.	50
Figura 3-6: plataforma triangular con apoyo sobre el lecho y ganchos para anclaje de tensor.	50
Figura 3-7: Rampa de cauce.	51
Figura 3-8: Refinamiento de la malla del álabe.	56
Figura 3-9: Condiciones de borde del álabe de una rueda hidráulica.	57
Figura 3-10: Esfuerzos sobre el álabe de la rueda hidráulica.	58
Figura 3-11: Geometría del soporte de pie SKF UCP 209-28 [26].	61
Figura 4-1: Alternador Horizontal de energía de agua con imán permanente.	64
Figura 4-2: alabes de la rueda hidráulica tipo Poncelet.	67

Figura 4-3: Vista de la corona y el ensamble de la rueda hidráulica.....	68
Figura 4-4: cuerpo principal de la plataforma de montaje de la rueda hidráulica.	69
Figura 4-5: Plataforma pivotante de la rueda hidráulica.	70
Figura 4-6: Diagrama de cuerpo libre del equipo ensamblado.....	70
Figura 4-8: Esfuerzos sobre la oreja donde se ejerce la tensión del tecele.	71
Figura 4-9: oreja de anclaje para levante. a) sobre el marco pivotante donde descansa la rueda. b) bajo el marco de la estructura principal donde reposa el peso de la estructura.....	72
Figura 4-10: Diseño final de la rampa de cauce de la rueda hidráulica.....	72
Figura 4-11: eje de transmisión diseñado para el equipo en Norma ASME B106.1.....	73
Figura 4-12: Diseño final de rueda hidráulica de Poncelet con plataforma, mecanismo de levante y rampa de cauce de agua.	73
Figura 4-13: Boceto del marco principal de montaje de la rueda hidráulica.....	74
Figura 4-14: boceto de la plataforma pivotante.....	75
Figura 4-15: Boceto de la corona o rueda de paletas.....	75
Figura 4-16: Boceto de los álabes de la rueda.	76
Figura 4-17: Boceto eje de transmisión.....	76
Figura 4-18: Boceto de la rampa de cauce.	77
Figura 4-19: Boceto del conjunto y listado de piezas de la rueda hidráulica.	77
Figura 4-20: Tecele manual de cadena, capacidad de levante 2,5 metros/ 500 kg	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1: Curva fuerza vs velocidad de giro de la rueda hidráulica. (Rojo: Rueda de palas planas. Azul: Rueda de Poncelet).....	52
Gráfico 3-2: Curva Potencia vs velocidad de giro de la rueda hidráulica. (Rojo: Rueda de palas planas. Azul: Rueda de Poncelet).....	53
Gráfico 3-3: Curva rendimiento vs velocidad de giro de la rueda hidráulica. (Rojo: Rueda de palas planas. Azul: Rueda de Poncelet).....	54
Gráfico 4-1: rangos de potencia teórica en función del caudal circulante en el canal La Florida.	80
Gráfico 4-2: Curva Fuerza vs Velocidad de la rueda hidráulica.	81
Gráfico 4-3: Curva potencia vs velocidad tangencial particular del equipo.....	82
Gráfico 4-4: curva rendimiento vs velocidad tangencial particular del equipo.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Escalas de potencia y su denominación internacional [2].....	15
Tabla 2-2: Valores del coeficiente n de Manning [12].....	23
Tabla 2-3: Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin [14].	38
Tabla 2-4: efecto de la temperatura de operación en la resistencia del acero [21].....	40
Tabla 2-5: Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga [21].....	41
Tabla 3-1: Resumen de parametros conocidos y variables libres para cálculo y diseño.....	46
Tabla 3-2: especificaciones geométricas preliminares de diseño de la rueda hidráulica.	49
Tabla 3-3: condiciones y potencia de la rueda hidráulica.	53
Tabla 3-4: Propiedades mecánicas de acero ASTM A36 [24].	55
Tabla 3-5: relación entre el espesor y el esfuerzo máximo ejercido sobre el álabe.	59
Tabla 3-6: Número de iteraciones en cálculo de diámetro del eje.....	60
Tabla 3-7: Condiciones de trabajo para la selección de rodamientos.....	60
Tabla 4-1: especificaciones técnicas del generador eléctrico [27].	64
Tabla 4-2: consumo artefactos eléctricos en el hogar [28].....	65
Tabla 4-3: elementos seleccionados para balance de consumo eléctrico	66
Tabla 4-4: reacciones sobre el sistema en equilibrio.....	71
Tabla 4-5: superficie total que requiere protección anticorrosiva.	78
Tabla 4-6: Costos asociados a compra e importación del generador eléctrico.....	84
Tabla 4-7: costos asociados a materiales de fabricación de la rueda hidráulica, plataforma y rampa de cauce (fecha cotización: 14 de octubre de 2021).....	85
Tabla 4-8: Costo de los elementos mecánicos necesarios para el equipo	86
Tabla 4-9: Valor servicio de fabricación de equipo.	87
Tabla 4-10: Costos del proyecto y presupuesto total necesario.....	87