



Facultad de  
Ingeniería

Departamento de Ingeniería en Materiales - Universidad Nacional de Mar del Plata

# Estudio de prefactibilidad de microgeneración en Laguna Sierra de los Padres

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero electromecánico

---

**Elia, Federico Nahuel**

**Proyecto Final de Grado  
Ingeniería Electromecánica  
2021**

**Director**

Ing. Zucal Ricardo

**Comisión evaluadora**

Dr. Roberts, Justo

Ing. Garin, Eduardo

Ing. Lopez, Marcos

Datos de contacto:

Dni: 40.017.607

Legajo: 11476

email: federiconahuelest@gmail.com

10 de Mayo de 2022, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Facultad de  
Ingeniería

Departamento de Ingeniería en Materiales - Universidad Nacional de Mar de Plata

# Estudio de prefactibilidad de microgeneración en Laguna Sierra de los Padres

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero electromecánico

---

**Elia, Federico Nahuel**

**Proyecto Final de Grado  
Ingeniería Electromecánica  
2021**

**Director**  
Ing. Zucal Ricardo

**Comisión evaluadora**  
Dr. Roberts, Justo  
Ing. Garin, Eduardo  
Ing. Lopez, Marcos

Datos de contacto:  
Dni: 40.017.607  
Legajo: 11476  
email: federiconahuelest@gmail.com

10 de Mayo de 2022, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco teórico</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción . . . . .	5
1.2. Energía hidráulica . . . . .	5
1.3. Situación energética de Argentina . . . . .	6
1.3.1. La respuesta institucional argentina frente al cambio climático . .	9
1.3.2. Sistema Argentino de Interconexión . . . . .	10
1.3.3. Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) . . . . .	12
1.3.4. Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) . . . . .	12
1.4. Hidrogeneración en Argentina . . . . .	12
1.4.1. Tipos de aprovechamientos . . . . .	13
1.5. Conceptos hidráulicos . . . . .	18
1.5.1. Aforo . . . . .	18
1.5.2. Salto de agua . . . . .	19
1.5.3. Orificios y compuertas . . . . .	20
1.6. Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAH) . . . . .	25
1.6.1. principales ventajas de los PAH . . . . .	26
1.7. Centrales eléctricas . . . . .	27
1.7.1. Presa . . . . .	28
1.7.2. Turbinas hidroeléctricas . . . . .	29
1.8. Tornillo de Arquímedes . . . . .	38
1.8.1. Aspectos económicos de los AST . . . . .	39
1.8.2. Ventajas sociales y para el medio ambiente . . . . .	40
1.8.3. Desventajas de generación con TA . . . . .	41
1.9. Conclusiones . . . . .	42

<b>2. Marco contextual</b>	<b>43</b>
2.1. Introducción . . . . .	43
2.2. localización del proyecto . . . . .	43
2.3. Cuenca de los Padres . . . . .	44
2.4. Ciclo hidrológico . . . . .	46
2.4.1. Red de drenaje . . . . .	49
2.5. Laguna de los Padres . . . . .	51
2.5.1. Morfometría de Laguna de los Padres . . . . .	52
2.6. Análisis hidrológico de la cuenca . . . . .	55
2.7. Conclusión y discusión de datos . . . . .	60
2.8. Análisis de la presa actual . . . . .	61
2.8.1. Caudales del tornillo de Arquímedes . . . . .	63
2.9. Conclusión . . . . .	69
<b>3. Diseño geométrico de turbina</b>	<b>71</b>
3.1. Introducción . . . . .	71
3.2. Compuerta propuesta . . . . .	71
3.2.1. Caudal de diseño para la presa propuesta . . . . .	73
3.3. Parámetros de diseño . . . . .	78
3.4. Inclinación del tornillo y número de filetes . . . . .	80
3.5. Paso, diámetro y velocidad de tornillo . . . . .	83
3.6. Ángulo de inclinación de aleta . . . . .	86
3.7. Volumen de balde . . . . .	96
3.8. Profundidad de la entrada de agua . . . . .	100
3.9. Rendimiento y potencia . . . . .	101
3.10. Conclusión . . . . .	107
<b>4. Sistema eléctrico de generación</b>	<b>109</b>
4.1. Introducción . . . . .	109
4.2. Métodos de generación . . . . .	109
4.2.1. Generación en CA . . . . .	109
4.3. Tecnología aplicada . . . . .	115
4.3.1. Motor sincrónico de imanes permanentes . . . . .	115
4.4. Conversión y control . . . . .	123
4.4.1. Control lado generador . . . . .	124
4.4.2. DC Link . . . . .	126
4.4.3. Sensor de velocidad . . . . .	128
4.4.4. Circuito de protección . . . . .	128
4.4.5. Control lado red (grid-side) . . . . .	129

4.4.6.	Diseño de convertidor de red . . . . .	134
4.4.7.	Diseño de convertidor de lado generador . . . . .	139
4.5.	Resultados simulación . . . . .	142
4.6.	Protecciones de sistema . . . . .	152
4.6.1.	Condiciones de puesta a tierra . . . . .	157
4.7.	Plan de mantenimiento preventivo eléctrico . . . . .	157
4.8.	Conclusión . . . . .	159
<b>5.</b>	<b>Esfuerzos mecánicos</b>	<b>161</b>
5.1.	Introducción . . . . .	161
5.2.	Material de construcción . . . . .	161
5.3.	Simulación fluidodinámica . . . . .	162
5.3.1.	Elección de material . . . . .	166
5.3.2.	proceso de fabricación . . . . .	167
5.4.	Cálculo de las reacciones y los rodamientos . . . . .	167
5.4.1.	Fuerza del agua sobre el tornillo . . . . .	169
5.4.2.	Cálculo del diámetro del arbol considerando tensiones estáticas . .	176
5.4.3.	Cálculo de sollicitación por fatiga . . . . .	178
5.4.4.	Elección de rodamientos . . . . .	181
5.5.	Conclusiones . . . . .	184
<b>6.</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>185</b>
6.0.1.	Vida útil de proyecto . . . . .	188
6.0.2.	Cálculo de depreciación . . . . .	189
6.1.	Flujo de caja . . . . .	189
6.1.1.	Cálculo del costo de KW-h de la instalación . . . . .	190
6.1.2.	Rentabilidad . . . . .	191
6.1.3.	Cálculo de tasa interna de retorno TIR . . . . .	193
6.2.	Conclusión . . . . .	194
<b>7.</b>	<b>Impacto ambiental</b>	<b>195</b>
7.0.1.	Metodología . . . . .	195
7.0.2.	Acciones del proyecto . . . . .	195
7.1.	matriz de importancia de impactos . . . . .	197
7.2.	Resultados de análisis . . . . .	200
7.3.	Conclusión . . . . .	204
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>205</b>
8.1.	Conclusiones finales . . . . .	208
8.2.	Propuestas de trabajos futuros . . . . .	210

<b>A. Scripts de MATLAB</b>	<b>213</b>
A.1. Introducción . . . . .	213
A.1.1. Cálculo de parámetros y diseño de tornillo . . . . .	213
<b>B. Simulación fluidodinámica</b>	<b>221</b>
B.1. Introducción . . . . .	221
B.1.1. Diseño de grometría . . . . .	221
B.1.2. Mallado . . . . .	223
B.1.3. Set Up . . . . .	230
B.1.4. Solver . . . . .	233
B.1.5. post-procesamiento . . . . .	234
<b>C. Catálogos</b>	<b>281</b>
<b>D. Modelo Simulink de convertidor</b>	<b>293</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>301</b>



# Índice de figuras

1.1. Evolución de la Potencia Instalada por año y tipo . . . . .	8
1.2. Participación energías renovables 2019 . . . . .	9
1.3. Sistema argentino de interconexión (SADI) y centrales de generación . .	11
1.4. Evolución potencia hidroeléctrica . . . . .	13
1.5. Central de pasada . . . . .	15
1.6. Central de pasada . . . . .	16
1.7. Central de bombeo . . . . .	17
1.8. Compuerta plana . . . . .	19
1.9. Coeficientes de velocidad, contracción y gasto . . . . .	22
1.10. Esquema de compuerta. . . . .	23
1.11. Toma de agua embalsada . . . . .	29
1.12. Turbinas de acción y reacción . . . . .	31
1.13. Turbinas axiales radiales y tangenciales . . . . .	32
1.14. Clasificación de turbinas . . . . .	33
1.15. Curva de rendimiento de turbinas . . . . .	37
1.16. Sección transversal de tornillo . . . . .	39
2.1. Ubicación geográfica de arroyo "La Tapera". . . . .	44
2.2. Ubicación geográfica de la Cuenca de los Padres. . . . .	45
2.3. Ciclo Hidrológico . . . . .	47
2.4. Circulación en acuífero . . . . .	48
2.5. Red de drenaje de cuenca LP. . . . .	50
2.6. Perfil topográfico de cuenca LP. . . . .	51
2.7. Áreas de laguna de LP . . . . .	53
2.8. Mapa de profundidad de laguna LP . . . . .	54
2.9. Volumen de la laguna . . . . .	55
2.10. Modelo de funcionamiento hidrológico de la laguna LP. . . . .	56
2.11. Datos meteorológicos de laguna LP. . . . .	58
2.12. Evaporación de la laguna . . . . .	59
2.13. Vista frontal de compuerta actual . . . . .	61
2.14. Vista frontal de presa actual . . . . .	62

2.15. Esquema de tornillo en el punto óptimo. . . . .	64
2.16. Características hidráulicas de la instalación . . . . .	65
2.17. Curva de eficiencia típica de turbina . . . . .	68
3.1. Vista frontal de presa propuesta . . . . .	72
3.2. Vista lateral y corte de presa propuesta . . . . .	73
3.3. Ubicación de sensor de medición de nivel . . . . .	74
3.4. Curva de duración de Caudales al 25% y 50%. . . . .	76
3.5. Curva de duración de Caudales al 75 y 100% . . . . .	77
3.6. Parámetros adimensionales óptimos . . . . .	79
3.7. Estudio de tornillo (relación $\eta$ vs. $\beta$ ) . . . . .	81
3.8. Eficiencia teórica . . . . .	82
3.9. Procedimiento para diámetro externo . . . . .	84
3.10. Relación $\lambda \cdot \nu$ . . . . .	85
3.11. Plano "z - y" del tornillo . . . . .	87
3.12. Plano "z - y" del tornillo. Fuente: [29] . . . . .	88
3.13. Desarrollo de hélice . . . . .	89
3.14. Superficie de contacto del agua. . . . .	90
3.15. Propiedades de superficies planas. . . . .	91
3.16. Cálculo de centroide. . . . .	92
3.17. Triangulo de velocidades . . . . .	95
3.18. Sección de modelo de tornillo. . . . .	97
3.19. Proceso iterativo de altura dimensional $\kappa$ . . . . .	98
3.20. Cálculo de resultados de $\nu_t vs. \kappa$ . . . . .	99
3.21. Nivel de agua entre aletas. . . . .	102
3.22. Procedimientos para diseño de turbina de Arquímedes óptima. . . . .	104
4.1. Esquema simplificado de generador sincrónico . . . . .	110
4.2. Esquema simplificado de generador de conmutador . . . . .	112
4.3. Esquema simplificado de generador de inducción de doble salida . . . . .	113
4.4. Esquema simplificado de generador sincrónico de campo modulado . . . . .	114
4.5. Esquema simplificado de generador sincrónico Back to Back . . . . .	115
4.6. Esquema de PMSG . . . . .	117
4.7. Circuito equivalente en eje d de PMSG . . . . .	119
4.8. Circuito equivalente en eje q de PMSG . . . . .	120
4.9. Torque de PMSG . . . . .	122
4.10. Potencia de PMSG . . . . .	122
4.11. Convertidor B2B . . . . .	123
4.12. Control lado generador . . . . .	124
4.13. Control lado generador Simulink . . . . .	126

4.14. Esquema de encoder. . . . .	128
4.15. Esquema controlador lado red . . . . .	130
4.16. Esquema de bloques controlador lado red . . . . .	131
4.17. Descomposición de plano ABC y plano d-q rotacional con velocidad $\omega_g$ y una fase aleatoria de ángulo $\theta_g$ . Fuente: [35] . . . . .	132
4.18. Control lado red Simulink. . . . .	134
4.19. Diagrama de bode PI loop interno lado red . . . . .	135
4.20. Diagrama de bode PI loop interno lado red con controlador aplicado . . .	136
4.21. Diagrama de bode PI loop externo lado red y controlador aplicado . . . .	137
4.22. Corrección de regulación del voltaje DC por $K_p$ . . . . .	138
4.23. Diagrama de bode PI loop externo lado red con controlador aplicado . .	139
4.24. Diagrama de Bode de control para convertidor lado generador y controlador PI . . . . .	141
4.25. Diagrama de Bode de control para convertidor lado generador controlado	142
4.26. Simulación de torque . . . . .	144
4.27. Simulación voltaje DC capacitor . . . . .	145
4.28. Simulación de potencia . . . . .	146
4.29. Simulación de tensión . . . . .	147
4.30. Simulación de tensión . . . . .	148
4.31. Simulación de tensión . . . . .	149
4.32. Régimen de operación de 4 cuadrantes . . . . .	150
4.33. Equipos seleccionados para generación . . . . .	151
4.34. Esquema unifilar del sistema generador . . . . .	153
4.35. Curva de llave termomagnética seleccionada . . . . .	154
4.36. Esquema de relé de seguridad y parada de emergencia . . . . .	156
4.37. Señalización del tablero . . . . .	158
5.1. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas distribuidas . . . . .	168
5.2. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas equivalentes . . . . .	169
5.3. Diagrama de corte . . . . .	172
5.4. Diagrama de momento en z . . . . .	173
5.5. Diagrama de esfuerzos normales plano XY . . . . .	174
5.6. Diagrama de corte plano XZ . . . . .	175
5.7. Diagrama de momento en y . . . . .	176
5.8. Sensibilidad a la entalla "q" . . . . .	179
5.9. Factor de concentración $K_t$ . . . . .	180
5.10. Selección de rodamiento 1 . . . . .	182
5.11. Selección de rodamiento 1 . . . . .	183
6.1. Diagrama de momento en y . . . . .	188

7.1. Modelo de importancia de impacto [54] . . . . .	199
7.2. Escala de impactos acorde a su importancia [54] . . . . .	200
7.3. Acciones impactantes del proyecto . . . . .	202
8.1. Vista preliminar de la turbina. Vistas laterales. . . . .	205
8.2. Vista preliminar de la turbina. Vista superior. . . . .	206
8.3. Vista preliminar de la turbina . . . . .	207
8.4. Vista preliminar de la turbina . . . . .	208
B.1. Geometría de tornillo en Ansys . . . . .	222
B.2. Corte de región rotativa en Ansys . . . . .	223
B.3. Regiones de geometría . . . . .	224
B.4. Malla región exterior . . . . .	225
B.5. Malla región interior . . . . .	226
B.6. Seccionamiento de malla (región interior) . . . . .	227
B.7. Parámetro de calidad: aspect ratio . . . . .	228
B.8. Parámetro de calidad: skewness . . . . .	229
B.9. Parámetro de calidad: orthogonal quality . . . . .	230
B.10. Setup de Fluent / condiciones de contorno . . . . .	232
B.11. Setup de Fluent / condiciones de simulación . . . . .	233
B.12. Resultados de fuerza y momentos en el tornillo . . . . .	234
B.13. Vista entrada de flujo de fluido . . . . .	235
B.14. Vista salida de flujo de fluido . . . . .	236
B.15. Presión - vista entrada . . . . .	237
B.16. Presión - vista salida . . . . .	238
B.17. Velocidad - vista entrada . . . . .	239
B.18. Velocidad - vista salida . . . . .	240
B.19. fuerza en Z - vista entrada . . . . .	241
B.20. fuerza en Z - vista salida . . . . .	242
B.21. fuerza en Y - vista entrada . . . . .	243
B.22. fuerza en Y - vista salida . . . . .	244
B.23. fuerza en X - vista entrada . . . . .	245
B.24. fuerza en X - vista salida . . . . .	246
B.25. Fuerza de corte en X - vista entrada . . . . .	247
B.26. Fuerza de corte en X - vista salida . . . . .	248
B.27. Fuerza de corte en Y - vista entrada . . . . .	249
B.28. Fuerza de corte en Y - vista salida . . . . .	250
B.29. Fuerza de corte en Z - vista entrada . . . . .	251
B.30. Fuerza de corte en Z - vista salida . . . . .	252
B.31. Módulos utilizados en Ansys Fluent . . . . .	253

B.32. Tensión elástica equivalente fibra de carbono . . . . .	254
B.33. Tensión equivalente total fibra de carbono . . . . .	255
B.34. Deformación total fibra de carbono . . . . .	256
B.35. Tensión elástica equivalente resina epoxy . . . . .	257
B.36. Tensión equivalente total resina epoxy . . . . .	258
B.37. Deformación total resina epoxy . . . . .	259
B.38. Tensión elástica equivalente resina polyester . . . . .	260
B.39. Tensión equivalente total resina epoxy . . . . .	261
B.40. Deformación total resina epoxy . . . . .	262
B.41. Tensión elástica equivalente compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven . . . . .	263
B.42. Tensión equivalente total compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven . . . . .	264
B.43. Deformación total compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven . . . . .	265
B.44. Tensión elástica equivalente poliamida Nylon 6 . . . . .	266
B.45. Tensión equivalente total poliamida Nylon 6 . . . . .	267
B.46. Deformación total poliamida Nylon 6 . . . . .	268
B.47. Tensión elástica equivalente polietileno de alta densidad HDPE . . . . .	269
B.48. Tensión equivalente total polietileno de alta densidad HDPE . . . . .	270
B.49. Deformación total polietileno de alta densidad HDPE . . . . .	271
B.50. Tensión elástica equivalente epoxy / fibra de carbono woven . . . . .	272
B.51. Tensión equivalente total epoxy / fibra de carbono woven . . . . .	273
B.52. Deformación total epoxy / fibra de carbono woven . . . . .	274
B.53. Tensión elástica equivalente epoxy E-glass Wet . . . . .	275
B.54. Tensión equivalente total epoxy E-glass Wet . . . . .	276
B.55. Deformación total epoxy E-glass Wet . . . . .	277
B.56. Tensión elástica acero estructural . . . . .	278
B.57. Tensión equivalente total acero estructural . . . . .	279
B.58. Deformación total acero estructural . . . . .	280
C.1. Motor-generador seleccionado . . . . .	282
C.2. Motor-generador seleccionado . . . . .	283
C.3. Encoder seleccionado . . . . .	284
C.4. Convertidor seleccionado . . . . .	285
C.5. Convertidor seleccionado . . . . .	286
C.6. Dimensiones de convertidor . . . . .	287
C.7. Variador seleccionado C2000 . . . . .	288
C.8. Dimensiones de variador seleccionado C2000 . . . . .	289
C.9. Selección de reactor . . . . .	290
C.10. Esquema de reactor . . . . .	291
C.11. Dimensiones de reactor . . . . .	292

D.1. Esquema de modelo de turbina-generador general . . . . .	293
D.2. Esquema de modelo de turbina-generador general . . . . .	294
D.3. Esquema de la turbina de Arquímedes . . . . .	295
D.4. Esquema de control PWM . . . . .	296
D.5. Esquema de filtro y transformación . . . . .	297
D.6. Esquema de convertidor lado red . . . . .	298
D.7. Esquema de filtro y transformación . . . . .	299

# Índice de Tablas

1.1. Clasificación de acuerdo a potencia instalada . . . . .	14
1.2. Clasificación de acuerdo al salto . . . . .	14
1.3. Pequeños aprovechamientos hidráulicos en Argentina <i>Instalaciones representativas</i> . . . . .	26
1.4. Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7] . . . . .	34
1.5. Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7] . . . . .	35
1.6. Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7] . . . . .	36
3.1. Promedios históricos de caudales . . . . .	78
3.2. Parámetros externos e internos de diseño . . . . .	78
3.3. Parámetros adimensionales geométricos de diseño . . . . .	78
3.4. Comparación de tornillos a distintos ángulos . . . . .	82
3.5. Datos del diseño geométrico de tornillo . . . . .	86
3.6. Propiedades de superficies planas . . . . .	91
3.7. Cálculo de centroide . . . . .	92
3.8. Resumen de centroides para distintos% de llenado . . . . .	93
3.9. Resumen de valores obtenidos de tornillo . . . . .	106
4.1. Tamaño de capacitor por potencia nominal en $\mu F/kW$ [44] . . . . .	127
4.2. Parámetros de utilidad para el diseño del PID [37] . . . . .	135
4.3. Parámetros de diseño del PI [37] . . . . .	136
4.4. Parámetros de diseño del PI [37] . . . . .	138
4.5. Parámetros de utilidad para el diseño del PID [37] . . . . .	140
4.6. Parámetros de diseño del PI [37] . . . . .	141
4.7. Valores base de simulación . . . . .	143
4.8. Sección de conductor de tierra . . . . .	157
5.1. Propiedades mecánicas de fibra de carbono [43] . . . . .	162
5.2. Propiedades mecánicas de resina epoxy [43] . . . . .	163
5.3. Propiedades mecánicas de resina polyester [43] . . . . .	163
5.4. Propiedades mecánicas de compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven [43] . . . . .	164
5.5. Propiedades mecánicas de Nylon 6 [43] . . . . .	164

5.6. Propiedades mecánicas de HDPE [43] . . . . .	165
5.7. Propiedades mecánicas de Epoxy /fibra de carbono woven [43] . . . . .	165
5.8. Propiedades mecánicas de Epoxy /fibra de vidrio wet [43] . . . . .	166
5.9. Propiedades mecánicas de Acero estructural [43] . . . . .	166
5.10. Factores de seguridad [46] . . . . .	177
5.11. Factores $C_f$ y $C_t$ [46] . . . . .	177
5.12. Tensiones material . . . . .	180
5.13. Resultados de tensiones fatiga . . . . .	180
5.14. Resultados de tensiones fatiga . . . . .	181
6.1. Costos de la obra . . . . .	185
6.2. Costos de la obra civil . . . . .	187
6.3. Beneficios anuales . . . . .	191
6.4. Valor presente neto . . . . .	193



# Nomenclature

$P_{th}$	Potencia de turbina
$\rho$	Densidad del agua 1.1
$H'$	Salto neto o eficiente
$\eta$	Rendimiento de turbina
$\bar{V}$	Velocidad media en el orificio
$C_v$	Coefficiente adimensional de corrección por velocidad
$b$	Ancho de canal de descarga
$a$	Altura de canal de descarga
$A_i$	Sección de compuerta real
$A_c$	Sección de compuerta real contraída
$Q'$	Descarga para orificio de grandes dimensiones y cargas pequeñas
$C_{d0}$	Coefficiente adimensional de descarga para orificios con contracción completa
$\phi$	Relación entre descarga $Q'$ y caudal teórico de pared delgada y pequeño (Cap. 1)
$A_t$	Área de la pared del recipiente en contacto con el agua
$C_d$	Coefficiente adimensional de descarga para orificios con contracción incompleta parcialmente suprimida
$Q_{si}$	Caudal de entrada de agua superficial dentro del agua o embalse
$Q_{ui}$	Flujo de entrada subterránea
$P_l$	Precipitación sobre lago
$E_l$	Evaporación sobre superficie de lago
$Q_{so}$	Caudal de salida de agua superficial
$Q_{uo}$	Caudal de salida subterránea
$Q$	Caudal nominal de diseño total
$Q_{nom}$	Caudal nominal de diseño útil
$m$	Numero de filetes
$V_b$	Volumen de agua entre dos cuchillas sucesivas
$n$	Velocidad de rotación
$Q_f$	Caudal por fugas entre carcasa y aletas
$Q_o$	Caudal de pérdidas por sobrellenado
$E_{hyd}$	Energía hidráulica aprovechable
$H_{hyd}$	Altura hidráulica aprovechable

$C_{ta}$	Torque del tornillo
$eta_{ta}$	Rendimiento total del tornillo
$C_{motor}$	Torque aprovechable
$C_{fricción}$	Torque perdido por roce
$eta_M$	Rendimiento del multiplicador
$eta_G$	Rendimiento del generador
$eta_O$	Rendimiento del inversor
$P_{mch}$	Potencia total del sistema
$eta_{mch}$	Rendimiento total del sistema
$D$	Diámetro externo
$d$	Diámetro interno
$L_b$	Longitud de tornillo
$\beta$	Ángulo de inclinación de tornillo
$m$	Número de aletas
$\omega$	Tasa de rotación
$\Lambda$	Paso o período de un filete (adimensional)
$\nu$	Relación de volumen
$\lambda$	Relación de avance
$\delta$	Relación de radios
$P_p$	Relación de avance con diámetro exterior
$V_t$	Volumen de agua en 1 ciclo del tornillo
$R$	Radio externo del tornillo
$r$	Radio interno del tornillo
$Q_p$	Caudal de pérdidas totales
$S_x$	Separación entre dos palas
$\alpha$	Ángulo interior de hélice
$\theta$	Ángulo exterior de hélice
$c_{ax}$	Velocidad axial de transporte
$\nu_t$	Relación de volumen total
$\alpha_8$	Ángulo del nivel de agua en el cilindro exterior
$\alpha_9$	Ángulo del nivel de agua en el cilindro interior
$h_3$	Altura de agua simplificada
$\epsilon$	Factor de pérdidas hidráulicas
$W$	Altura de apoyo
$h_1$	Altura de entrada de agua por canal
$h_2$	Altura del agua en el plano perpendicular del canal a la entrada del tornillo
$h_4$	Nivel de agua óptimo de descarga
$\Delta_d$	Diferencia de altura del nivel de agua en las palas
$\lambda_i$	Enlaces de flujo inducidos por las corrientes y el imán permanente

$V_i$	Voltajes instantáneos del estator en fase ABC
$L_{ii}$	Autoinductancias de fase ABC
$R_s$	Resistencia del devanado del estator en la fase ABC
$V_{dq0}$	Voltajes en el marco rotacional d-q
$i_{dq0}$	Corrientes en el marco rotacional d-q
$G_d(s)$	Función de transferencia de primer orden
$v_{ctrl}$	Voltaje de control de entrada
$T_a$	Retardo de tiempo
$E_d$	Fuerza electromotriz inversa en el eje d-q
$\theta_g$	fase aleatoria de ángulo
$i_f$	Corriente de campo
$i_{st}$	Corriente de campo del estator
$\Delta v_{dc}$	Valor pico a pico permitido de ondulación de tensión en el enlace de CC
$H_{OL,r}$	Función de transferencia del loop interno del lado red
$G_c$	Función de transferencia del controlador
$K_i$	Parámetro inductivo de controlador
$K_p$	Parámetro proporcional de controlador
$v(t)$	Vectores espaciales de tensión
$i(t)$	Vectores espaciales de corriente
$S_{base}$	Potencia aparente base
$V_{base}$	Voltaje de LL base
$f_{base}$	Frecuencia base
$W_t$	Peso de tornillo
$P_{agua}$	Peso de agua
$C_{fl}$	Coefficiente de flexión
$C_{to}$	Coefficiente de torsión.
$C_s$	El factor de superficie 5.27
$C_t$	El factor de tamaño 5.27
$C_c$	El factor de confiabilidad 5.27
$\sigma_a$	Esfuerzo alterno o variable 5.31
$\tau_m$	Esfuerzo medio 5.30
$L_{10h}$	Vida de rodamiento 5.33
$C_{Din}$	Capacidad de carga dinámica 5.38
$C_{Est}$	Capacidad de carga estática 5.38
$VR_n$	Valor residual del bien en un año determinado 6.1
$V_p$	Valor presente del proyecto 6.4



---

## Resumen

El presente trabajo se exponen los resultados del estudio de prefactibilidad en la incorporación de una turbina de Arquímedes en un pequeño aprovechamiento ubicado en la laguna de Los Padres.

El estudio fue realizado consultando y relevando datos de interés con la colaboración del IGCyC y OSSE junto a mediciones in situ. A través de la recompilación de información se determinó la potencia del aprovechamiento teniendo en cuenta caudal y altura disponible donde la turbina más apropiada es un tornillo de Arquímedes.

El diseño geométrico debe realizarse de forma particular para cada emplazamiento y los valores óptimos son calculados mediante el cómputo de diversos parámetros y con ayuda de un script de MatLAB que permite modificary establecer variables para obtener resultados de forma más sencilla y rápida.

Este programa de cálculo permitió simular, mediante su software SIMULINK, el controlador aplicado y simular a través de un modelo en bloques del sistema. De esta forma obtener el comportamiento eléctrico del equipo. Con estos resultados se eligió el sistema de potencia y elementos de protección de la instalación.

Para determinar el material más adecuado de fabricación se dibujó la instalación y, particularmente el tornillo, en un programa de diseño 3D "SolidWorks". Utilizando el diseño de tornillo y volcarlo en un software de análisis fluidodinámico CFD "ANSYS" se evaluó el comportamiento de distintos materiales a las solicitaciones esperadas. En base a ésta simulación, se corroboró el diseño del eje y su comportamiento a solicitaciones estáticas y dinámicas junto con la elección por catálogo de los rodamientos de apoyo. Finalmente, se diseñó la instalación completa emplazada en la obra civil existente para visualizar el prototipo final.

Con un análisis económico y ambiental se llegó a la conclusión de que es un sistema con costo bajo-medio para este tipo de energía renovable pero elevado en comparación con aprovechamientos solares con un retorno en el medio-largo plazo, aunque, con una robustez de operación superior. Ésta turbina de Arquímedes es una turbina ecológica, con bajo impacto ambiental y es una alternativa interesante de aplicación en ríos y embalses con la posibilidad de trabajar en paralelo o en serie aportando a la red interconectada como a cargas remotas.

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mi Madre (Laura) y mis dos hermanas (Florencia y Paula), por ser los principales motores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas.

Agradezco también a mis abuelas, tíos y primos por su apoyo incondicional.

A mis amigos, especialmente, por acompañarme y brindarme apoyo durante estos años con charlas entre mate y mate.

A mi director Ricardo, por confiar en mí para participar en este proyecto, por su dedicación y aliento durante todo el proceso.

A mis amigos nuevamente pero los que encontré durante este largo y hermoso camino, por las de horas de risa y estudio juntos. Y por hacer de esas tardes de cursada mucho más fácil.

A ellos y tantas personas que no puedo nombrar en una hoja de papel, gracias...

Federico

## Introducción

El aprovechamiento del agua para la generación de energía comenzó en tiempos antiguos con el uso de ruedas hidráulicas muy elementales pero que permitían la producción de fuerza motriz para aliviar el trabajo manual del hombre. Con el venir del tiempo, estas ruedas evolucionaron y acompañaron la era industrial donde grandes avances tecnológicos para la conversión de energía tuvieron lugar. Es allí donde la rueda hidráulica fue superada y reemplazada por las turbinas a partir del inicio del siglo XIX.

Fuerza motriz primero y energía eléctrica fueron los productos energéticos obtenidos gracias a el aprovechamiento del agua. Actualmente, la energía hidroeléctrica aporta más del 16% del total de la electricidad consumida en el mundo, constituyendo una fuente fundamental para cualquier país, ya que utiliza recursos renovables y no degradables. En nuestro país, la potencia instalada de energía hidroeléctrica representó en el 2016, el 33,1% del total. La energía aprovechada de los cursos de agua realiza la confiabilidad de los sistemas eléctricos, permite generar en forma limpia, sin emitir gases de combustión a la atmósfera y es una tecnología eficiente y de bajo costo operativo [1].

Los módulos de potencia de los productores vinculados a el sistema eléctrico son crecientes y a mayor escala en zonas que cuentan con los recursos necesarios. Sin embargo, hay una creciente tendencia a volcarse a la generación hidráulica de pequeña escala en ciertos casos. Quedan aún grandes áreas geográficas sin servicio eléctrico y la población rural que las habita se encuentra mayoritariamente en situación precaria, con niveles de actividad económica de subsistencia y altos índices de necesidades sociales básicas insatisfechas [2]. En la actualidad existen diferentes sistemas de generación hidráulico en saltos, lagos, embalses, entre otros. Cada caso debe ser estudiado en forma particular con un estudio hidrogeológico de la zona ya que hay diversos factores que condicionan y limitan las posibilidades óptimas de sistemas turbina-generador. En este proyecto se estudiará la factibilidad y prediseño de una micro-turbina en la naciente del Arroyo "La Tapera" de la Laguna de los Padres, Mar del Plata, Argentina.

## Alcance y objetivos

### Justificación ambiental

Desde las últimas décadas se ha impulsado la implementación de energías renovables. Famosos acuerdos internacionales como el de Paris, por ejemplo, impulsan e incentivan la aceleración de transformación del sector energético. El principal objetivo es contribuir a la reducción de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero provocados en gran parte por el desmedido uso de combustibles fósiles. Si bien la disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año una de las ventajas, en algunos casos, es la posibilidad de almacenamiento físico en embalses, presas, etc. Además, una

micro-turbina utiliza menor cantidad de agua y provoca un menor impacto en el ambiente local.

### **Justificación económica**

Una de las desventajas de la generación hidroeléctrica son las grandes inversiones necesarias. Una instalación de una micro turbina disminuye notablemente la inversión inicial. La capacidad de generación del sistema dependerá del régimen hidrológico de la zona y podría aportar a la red debido a la creciente demanda registrada en los últimos años o bien trabajar independientemente de ésta para zonas rurales cercanas lo cual ahorraría el tendido eléctrico.

### **Justificación social**

Como ya se ha nombrado antes, existen áreas rurales sin acceso a la energía eléctrica. Son regiones que tampoco fueron beneficiados por la ejecución de políticas sistemáticas que permitieran la generalización de tecnologías energéticas alternativas a los sistemas eléctricos regionales primero y nacional más tarde.

La falta de acceso a la energía eléctrica es causa de marginalidad, genera pobreza e impide el desarrollo de las comunidades. Esto, muchas veces obliga a los pobladores rurales a migrar a las grandes urbes, en busca de mejores condiciones de vida.

Es importante generar promoción para el aprovechamiento local de los recursos para la generación eléctrica con el menor impacto ambiental posible. A tal efecto, las tecnologías a emplear como fuentes de captación de la energía son los sistemas fotovoltaicos, eólicos, mini y microhidráulicos, etc.

### **Metodología y estructura**

El siguiente proyecto buscará realizar la mejor opción de aprovechamiento en un emplazamiento determinado hidráulico de la ciudad de Mar del Plata. Para ello debe realizarse un análisis de la situación económica, social y ambiental tanto en el marco nacional como local. Se debe recaudar datos útiles que sean de interés para el correcto análisis.

Se diseñará el modelo de la turbina buscando la configuración que permita obtener el máximo rendimiento velando por cuidar el gasto en la obra y se simulará las condiciones de operación para obtener el material más adecuado. Se evaluarán los esfuerzos mecánicos de este y de los apoyos para asegurar una vida útil que cumpla lo esperado. Se simulará la conversión de la energía y se elegirán comercialmente los elementos necesarios para el funcionamiento y puesta en marcha. Por último, se observarán los riesgos e impacto ambiental de instalación y operación por lo que se hará un estudio de impacto



y se confeccionará un plan de mantenimiento, operación y los recaudos de seguridad que deberán cumplirse.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una turbina de Arquímedes para la microgeneración eléctrica. Es importante incrementar el uso de recursos naturales que permitan, no solo en áreas comunes, sino en todo el territorio del país donde se puedan desarrollar los métodos de sistemas de generación de energía limpia aprovechando distintos emplazamientos hidroeléctricos distribuidos. Esto permitirá lograr un mayor alcance a comunidades y consumos que resulten lejanos de la red ordinaria de distribución facilitando el acceso u ahorro de consumo de electricidad.



# Capítulo 1

## Marco teórico

### 1.1. Introducción

En el presente capítulo se hablará del contexto para empezar a estudiar el proyecto. Se presenta los conceptos básicos necesarios para proseguir con un diseño mas detallado así como tambien el contexto que se evalúa.

### 1.2. Energía hidráulica

Se denomina energía hidráulica o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, saltos de agua o mareas.

Ofrece un potencial significativo para la reducción de emisiones de carbono y sigue siendo la mayor fuente de energía renovable en el sector eléctrico a nivel mundial. Es una energía técnicamente madura, predecible y a menudo competitiva con los precios del mercado. Tiene una de las mejores eficiencias de conversión de todas las conocidas fuentes de energía (alrededor del 90% de eficiencia).

El potencial del recurso hidroeléctrico se puede derivar del flujo total disponible multiplicado por altura. Dado que la mayoría de las precipitaciones suelen caer en áreas montañosas, donde las diferencias de elevación (head) son las más grandes, el mayor potencial para el desarrollo de energía hidroeléctrica se encuentra en zonas montañosas o en ríos que provienen de tales regiones. [3]

El principal componente de una central hidroeléctrica es una turbina hidráulica. La energía que una turbina hidráulica extrae del agua depende tanto del caudal que conduce como de la diferencia de altura existente entre los reservorios superior e inferior, denominada caída o “salto aprovechable”. Por el contrario, una rueda hidráulica (mucho menos eficiente) aprovecha directamente la energía cinética de la corriente.

En cualquier caso, la potencia desarrollada por un generador eléctrico acoplado al eje de una turbina hidráulica responde en forma aproximada a la ecuación (1.1):

$$P_{th} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \quad (1.1)$$

Donde:  $P_{th}$ : Potencia de turbina (Watt)  $Q$ : Caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ]  $H$ : Salto neto o eficiente [m]  
 $\rho$ : Densidad del agua [ $\frac{Kg}{m^3}$ ]  $\eta$ : Rendimiento de turbina [16]

### 1.3. Situación energética de Argentina

La matriz energética es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón.

La Argentina, al igual que el resto del mundo, utiliza un alto porcentaje de hidrocarburos. El petróleo y el gas alcanzan casi el 90% del total de la oferta energética del país. La Argentina no consume cantidades significativas de carbón (0,9% del total), a diferencia de otros países como China, los Estados Unidos o Alemania, donde el carbón es una de las fuentes más utilizadas. Desde el punto de vista ambiental, el uso de gas es una ventaja, pues es un combustible más limpio que el carbón, ya que produce una emisión de dióxido de carbono menor [1].

El petróleo es actualmente la fuente de energía predominante en el mundo y es una materia prima fundamental para elaborar una gran cantidad de productos de uso cotidiano. Sus propiedades lo convierten en un material único por su alto contenido energético en relación con su volumen y su peso, y la facilidad para extraerlo, transportarlo y almacenarlo. Su uso es indispensable para el transporte, ya que más del 95% depende de él. En la Argentina se consume actualmente una proporción cercana al promedio mundial (34,5%).

El gas natural tiene un gran desarrollo en la Argentina y una gran participación en nuestra matriz energética. El descubrimiento del mega yacimiento de Loma la Lata, en la provincia del Neuquén, en la década del setenta, fue el punto de partida para el incremento del uso del gas y produjo un cambio significativo en la matriz energética nacional. Actualmente, el gas natural alcanza más de la mitad de los consumos energéticos del país (53%), y se utiliza para los hogares, la industria y la generación eléctrica.

El reciente desarrollo de los recursos no convencionales de gas y petróleo, shale gas y shale oil, permitirá abastecer la creciente demanda de energía. A nivel mundial, la Argentina tiene la segunda reserva de gas y la cuarta de petróleo no convencional, lo que posibilitaría aumentar nueve veces las reservas de petróleo y treinta veces las reservas

de gas. Este potencial es fundamental para lograr el autoabastecimiento energético de manera sostenida.

Por otra parte, la energía hidráulica (4%) y la nuclear (2%) han crecido en los últimos cuarenta años debido fueron usadas para generar electricidad. La energía eólica y la energía solar son aún incipientes y no tienen un impacto considerable sobre la oferta total de energía del país. Sin embargo, progresivamente adquieren mayor relevancia para la generación de energía eléctrica y se espera que en los próximos años aumenten su participación en la matriz energética total.

A continuación, en la figura 1.1 se podrá observar la composición año tras año de la generación del país.

La generación ingresante durante el año fue superior a los 1600 MW, dentro de los cuales se destaca el ingreso de nueva potencia de algo más de 1100 MW de energías renovables. El aumento de la generación renovable y nuclear redujo el requerimiento de generación térmica total y el consumo de combustibles asociado.

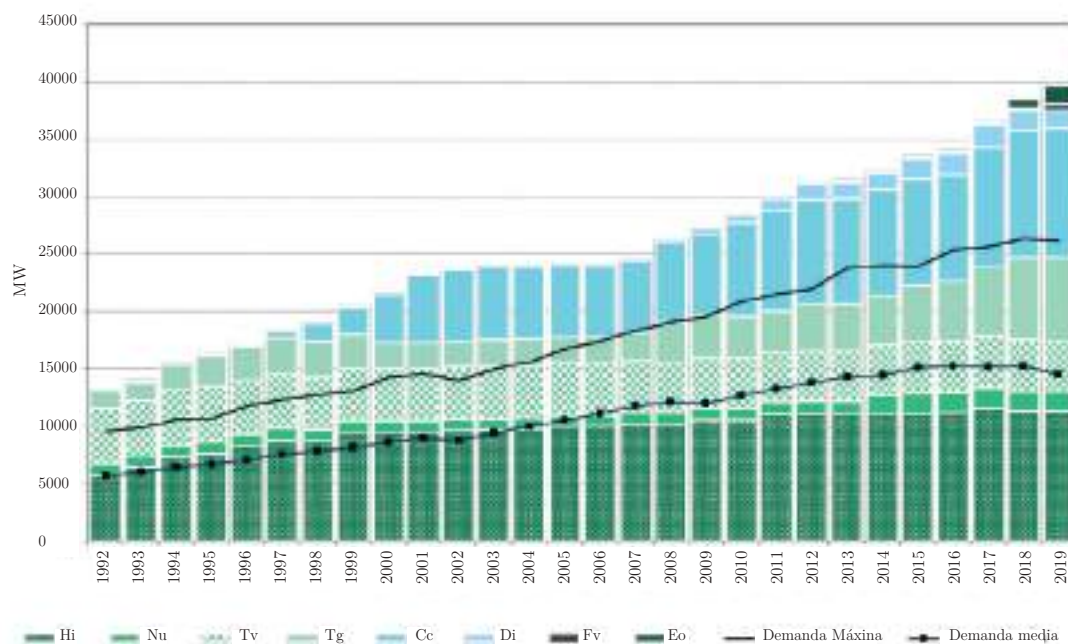


Figura 1.1: Evolución de la Potencia Instalada por año y tipo *Hi*: 'hidroeléctrica', *Nu*: 'nuclear', *Tv*: 'turbovapor', *Tg*: 'turbina a gas', *Cc*: 'combustibles combinados', *Di*: 'diésel', *Fv*: 'fotovoltaico', *Eo*: 'eólico'. (HI contiene la potencia instalada clasificada con Hidráulica Renovable). Fuente: [6]

Cabe destacar que en los últimos años se ha incentivado e impulsado el uso de las energías renovables, dentro de estas las centrales hidroeléctricas renovables. Alcanzando una cifra de abastecimiento total del 6.1 % del mercado eléctrico mayorista (MEM). En la figura 1.2 se muestra la participación específicamente de cada tipo.

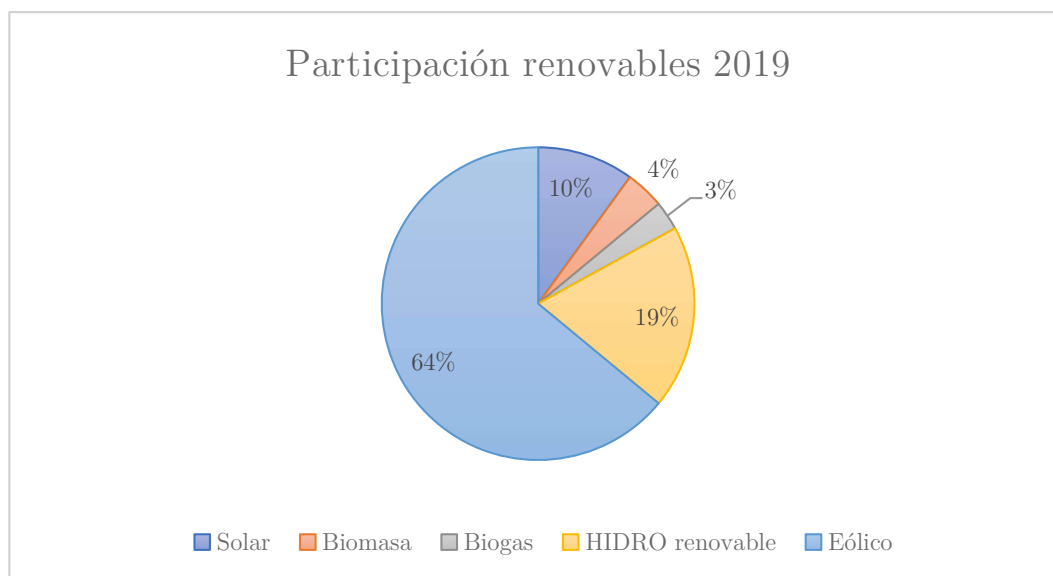


Figura 1.2: Participación energías renovables 2019. Fuente: [6]

### 1.3.1. La respuesta institucional argentina frente al cambio climático

Según se afirma en la Segunda Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (República Argentina, 2007), la República Argentina es fiel a los compromisos oportunamente asumidos ante la Convención en su condición de país y reconoce la importancia de “los esfuerzos dirigidos a hacer frente al cambio climático, la eficacia de las políticas y medidas puestas en vigor por las Partes” a la luz de las diferentes responsabilidades que las distintas partes tienen. A la vez, se sostiene en esa misma comunicación que “en el plano nacional se han adoptado medidas dirigidas a mitigar el cambio climático”, enunciando luego una lista de programas a ese efecto.

También se ha expresado formalmente que el “Gobierno ha puesto en marcha políticas y medidas que constituyen una expresión de la voluntad de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como la protección de los ecosistemas. Como parte de esas decisiones se incluye en primer término la promoción de energía de fuentes renovables con el fin de asegurar su participación creciente en la

matriz energética, la búsqueda de la eficiencia energética mediante programas dirigidos a tal fin y la preservación de los bosques nativos”.

En un contexto de crecimiento económico sostenido resulta útil orientar las decisiones de inversión hacia tecnologías más eficientes y competitivas, a la vez que menos contaminantes. Por otra parte, en los últimos años, y pese a las demoras en concretarlo, la comunidad internacional ha desarrollado una serie de arreglos de financiamiento e instrumentos con el objeto de reasignar las inversiones corrientes, desde aquéllas que continúan orientándose al uso de combustibles fósiles hacia opciones que permiten una transición hacia un crecimiento bajo en emisiones. Sin embargo, es aún reducido el número de países que ha desarrollado las capacidades para aprovechar esas fuentes de recursos ya disponibles en el marco de sus estrategias de desarrollo [10].

### **1.3.2. Sistema Argentino de Interconexión**

El mapa eléctrico argentino está determinado por el Sistema Argentino de Interconexión (SADI). Este vincula mediante líneas de alta, media y baja tensión a todas las grandes unidades de generación con los grandes centros de consumo y todas las redes locales de distribución.

Hasta 1973 el SADI estaba conformado por las redes del Gran Buenos Aires y la Región Litoral. A partir de ese año, tras la inauguración de la central hidroeléctrica El Chocón, se integra la región Comahue. En los siguientes años se irán incorporando las restantes redes regionales. En 1986 se realiza la conexión de la región NOA. En 2006 se conforma el actual sistema, tras la incorporación de la patagonia (ver figura 1.3).

En la figura 1.3 se puede ver divisiones por region, 9 regiones específicamente.

- BAS: Provincia de Buenos Aires.
- CEN - Centro: Córdoba y San Luí.
- COM - Comahue: Neuquén, Río Negro y La Pampa.
- CUY - Cuyo: Mendoza y San Juan.
- GBA - Gran Buenos Aires.
- LIT - Litoral: Entre Ríos y Santa Fe.
- NEA - Noreste Argentino: Corrientes, Chaco, Formosa y Misiones.
- NOA - Noroeste Argentino: Catamarca, Jujuy, Salta, La Rioja, Santiago del Estero y Tucumán.
- PAT - Sistema Interconectado Patagónico: Chubut, Parte de Río Negro y Santa Cruz, Sur de Prov. de Buenos Aires [18].





Figura 1.3: Sistema argentino de interconexión (SADI) y centrales de generación. Fuente: [6]

### 1.3.3. Mercado Eléctrico Mayorista (MEM)

Mediante la Ley 24065, de diciembre de 1991, se definió el MEM (Mercado Eléctrico Mayorista) para toda la República Argentina. Los agentes reconocidos del MEM son: a) Generadores de energía eléctrica; b) Transportistas de energía eléctrica; c) Distribuidores de Energía eléctrica; d) Grandes Usuarios de energía eléctrica. Las empresas comercializadoras y los medianos y pequeños usuarios no son agentes, sino simples actores [18]..

### 1.3.4. Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE)

El Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) es un organismo autárquico encargado de regular la actividad eléctrica y de controlar que las empresas del sector (generadoras, transportistas y distribuidoras Edenor y Edesur) cumplan con las obligaciones establecidas en el Marco Regulatorio y en los Contratos de Concesión [12].

## 1.4. Hidrogeneración en Argentina

En Argentina la hidroeléctrica posee una alta cuota de participación en la generación eléctrica total (33% en promedio). Históricamente, la construcción de los grandes aprovechamientos que hoy prestan servicio ha favorecido la creación de empleo, la promoción económica y social de sus zonas de influencia, y la concreción de importantes obras de infraestructura para riego, provisión de agua potable, turismo y control de inundaciones.

La larga vida útil de las instalaciones hidroeléctricas, así como su bajo costo de mantenimiento, los usos multipropósitos de los embalses y el desarrollo económico y social que esto trae aparejado, son algunas de las razones a favor de generar electricidad a partir del agua [1].

En la figura 1.4 se puede ver el crecimiento de la energía producida mediante hidrogeneración a lo largo de los años:

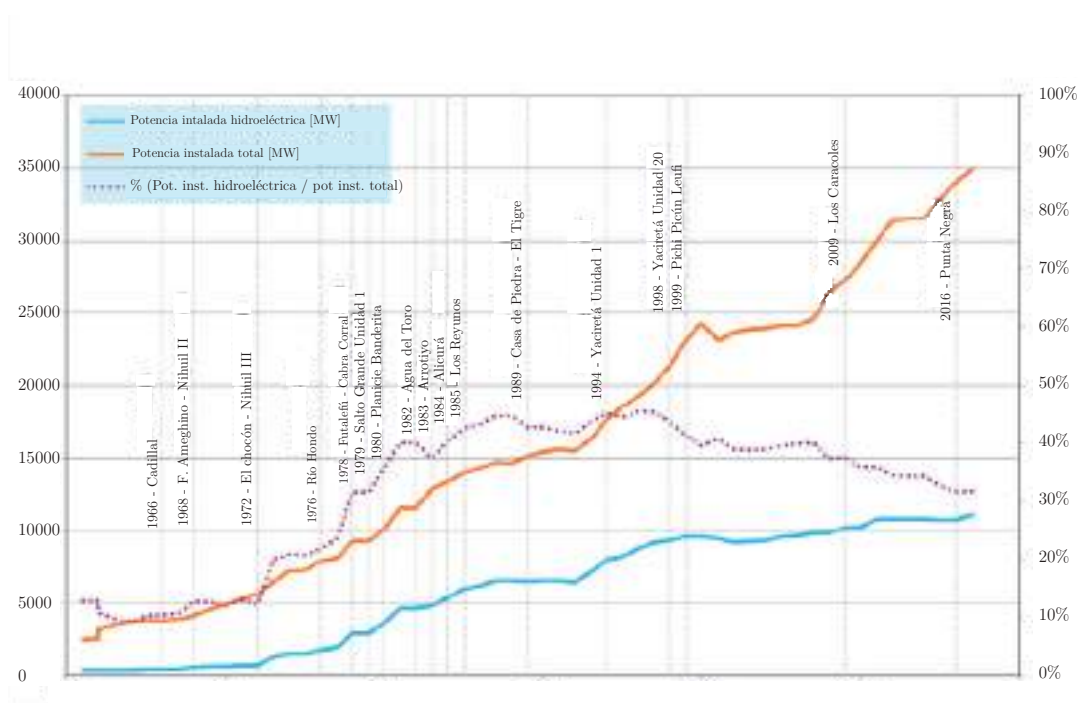


Figura 1.4: Potencia hidroeléctrica, Argentina. *Evolución de la potencia instalada hidroeléctrica vs Potencia instalada total.* Fuente: [1]

### 1.4.1. Tipos de aprovechamientos

Hay diferentes clasificaciones de centrales hidroeléctricas. Desde el punto de vista constructivo corresponden (esencialmente) a tres grupos:

- De embalse, con central a pie de presa.
- De pasada, y alta caída, que aprovechan la pendiente del terreno.
- De pasada, y baja caída, construidos sobre ríos de llanura y canales de riego.

Los aprovechamientos de pasada no requieren reservorio, pero al carecer de capacidad de almacenamiento son altamente dependientes de las variaciones naturales del caudal del río. Contrariamente, los aprovechamientos a embalse pueden ser “despachados” y ajustarse rápidamente a las variaciones de demanda, que es una característica muy valiosa para el sistema eléctrico [4]. En este proyecto, el agua estará embalsada mediante una presa y compuerta que permitirá regular el caudal de desagote. Se utiliza actualmente para controlar el nivel de la laguna y del arroyo aguas abajo.

También pueden ser clasificados de acuerdo a potencia, salto, captación, capacidad de regulación, tipo de sistema eléctrico, etc. De manera orientativa se citan a continuación las dos más usuales, que son potencia y salto de diseño resumidos en la tabla 1.1:

<b>Categoría</b>	<b>Rango de potencia[kW]</b>
Pico central	0-5
Micro-central	5-50
Mini-central	50-500
Pequeña central	500-30.000
Mediana central	30.000-50.000
Gran central	>50.000

Tabla 1.1: Clasificación de acuerdo a potencia instalada

Otra clasificación de importancia es de acuerdo a la caída resumida en la tabla 1.2. Se trabajará a lo largo de este trabajo con una baja caída, lo que limitará las turbinas que se podrán utilizar.

<b>Categoría</b>	<b>Caída[m]</b>
Baja caída	2-30
Media caída	30-100
Alta caída	>100

Tabla 1.2: Clasificación de acuerdo al salto

### Aprovechamiento en centrales de pasada

Esta clase de centrales utiliza el agua mientras ésta fluye normalmente por el cauce de un río. Se sitúan en los lugares en que la energía hidráulica ha de emplearse en el momento mismo que se tiene disposición de ella, con el fin de accionar las turbinas hidráulicas.

El caudal suministrado varía dependiendo de las estaciones del año. Cuando las precipitaciones son abundantes (temporada de aguas altas), estas centrales producen su máxima potencia y el agua excedente sigue de largo. En la temporada de aguas bajas, cuando el tiempo es seco, la potencia desarrollada disminuye notablemente.

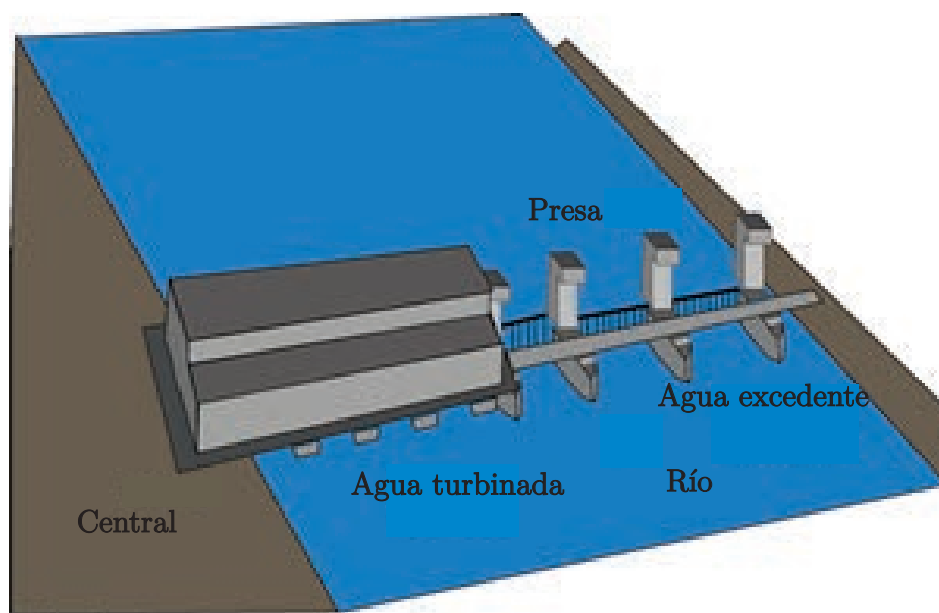


Figura 1.5: Central de pasada. Fuente: [5]

Generalmente son construidas formando presa sobre el cauce de los ríos, con el objetivo de mantener un desnivel constante en el caudal de agua.

### Aprovechamiento en centrales de agua embalsada

Estas centrales utilizan el agua que llega oportunamente regulada, desde un lago o pantano artificial, denominados embalses, logrados a partir de la construcción de presas. Un embalse tiene la capacidad de hacinar los caudales de los ríos afluentes. El agua almacenada se utiliza mediante los conductos que la dirigen hacia las turbinas.

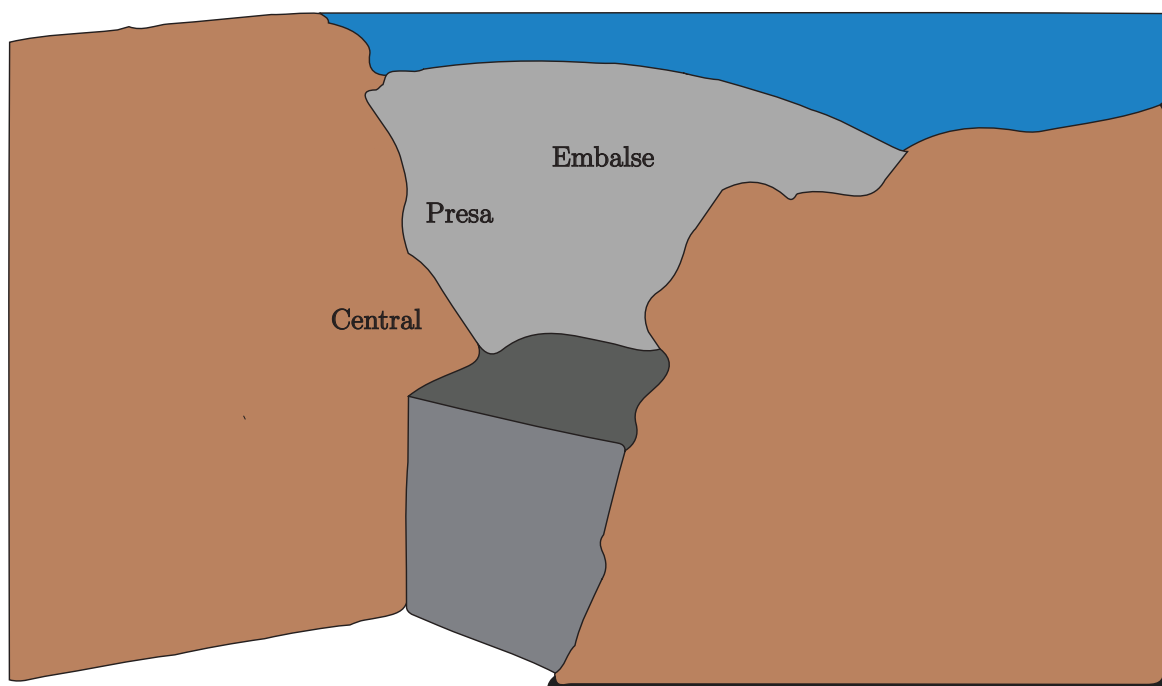


Figura 1.6: Central de embalse. Fuente: [5]

Se clasifican en centrales de regulación y centrales de bombeo (o de acumulación). Las centrales de regulación se caracterizan por los volúmenes de agua que son capaces de acumular en el embalse, los cuales representan períodos de aportes de caudales medios anuales, más o menos duraderos (ver figura 1.7). Esta característica le da la posibilidad de asistir cuando los caudales se encuentran bajos, así como también cubrir eficientemente las horas punta de consumo.

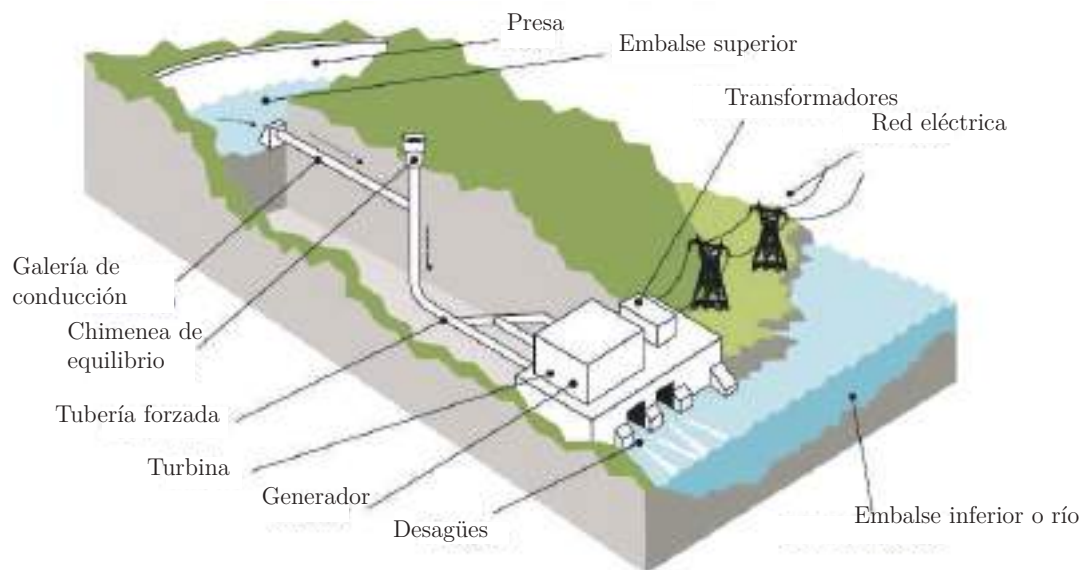


Figura 1.7: Esquema y partes principales de central de bombeo. Fuente: [5]

Las centrales de acumulación son centrales de embalse que aglomeran caudales a través del bombeo. Según sea la altura del salto de agua existente, o desnivel, las centrales también pueden clasificarse en:

- Centrales de alta presión:

Son aquellas centrales que tienen un valor de salto hidráulico mayor a los 200 m aproximadamente. Los caudales desalojados a través de estas centrales son pequeños, de solo  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  por máquina. El lugar de emplazamiento suele ser en zonas de alta montaña, debido que aprovechan el agua de torrentes que desemboca en los lagos naturales.

Estas centrales sólo emplean turbinas Pelton y turbinas Francis, las cuales reciben el agua mediante conductos de extensa longitud.

- Centrales de media presión:

Los saltos hidráulicos que forman estas centrales, poseen una altura de entre 200 y 20 m aproximadamente. Esta característica les permite desaguar caudales de hasta  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada turbina. El funcionamiento de estas centrales está condicionado por embalses de gran tamaño, formados en valles de media montaña.

En estas centrales, las turbinas empleadas son de tipo Francis y Kaplan; en el caso de los saltos de mayor altura, puede que sean utilizadas turbinas Pelton.

- Centrales de baja presión:

Se consideran como tales, las centrales que poseen saltos hidráulicos inferiores a 20 m. Normalmente, se utilizan bajas alturas y grandes caudales pero en este caso de estudio cabe aclarar que los caudales que se manejan son limitados a el régimen hidrológico de la cuenca.

## 1.5. Conceptos hidráulicos

### 1.5.1. Aforo

Por aforo se entiende el proceso mediante el cual se mide el valor de un caudal. Las mediciones pueden realizarse teniendo en cuenta la sección del conducto, la altura de lámina o calado, la presión en algunos puntos, etc [5]. La evaluación de las técnicas y aparatos de medición ha progresado dando como resultado una amplia gama de tipos y diseños. En general se puede decir que cualquier estructura hidráulica puede constituir un dispositivo de medición.

Tomando estas características como base se puede proponer la siguiente clasificación:

- Vertederos
- Orificios y compuertas
- Aforadores de sección crítica

Para el caso particular de este proyecto, se trabaja con una presa y una compuerta con una sección rectangular aunque sirve a un propósito diferente al de la medición. El empleo de orificios se limita, por razones obvias, a la medición de gastos reducidos; en especial conviene hacerse en funcionamiento sumergido, ya que en estas condiciones de operación, se cuenta con mayor información experimental. Por otra parte el empleo de compuertas, es difícil de hacer en forma sistemática, ya que se introduce un grado de error muy grande; es conveniente usarlas para estimar, en forma aproximada, el rango de gastos que ocurren en un canal.

Una compuerta es una placa recta o curva que se coloca en oposición al sentido de flujo para regular el gasto que pasa bajo ella. Hay una pequeña discrepancia entre el valor de caudal que se calcula teóricamente y el práctico, esto es debido a la pérdida de carga en el trayecto de salida.



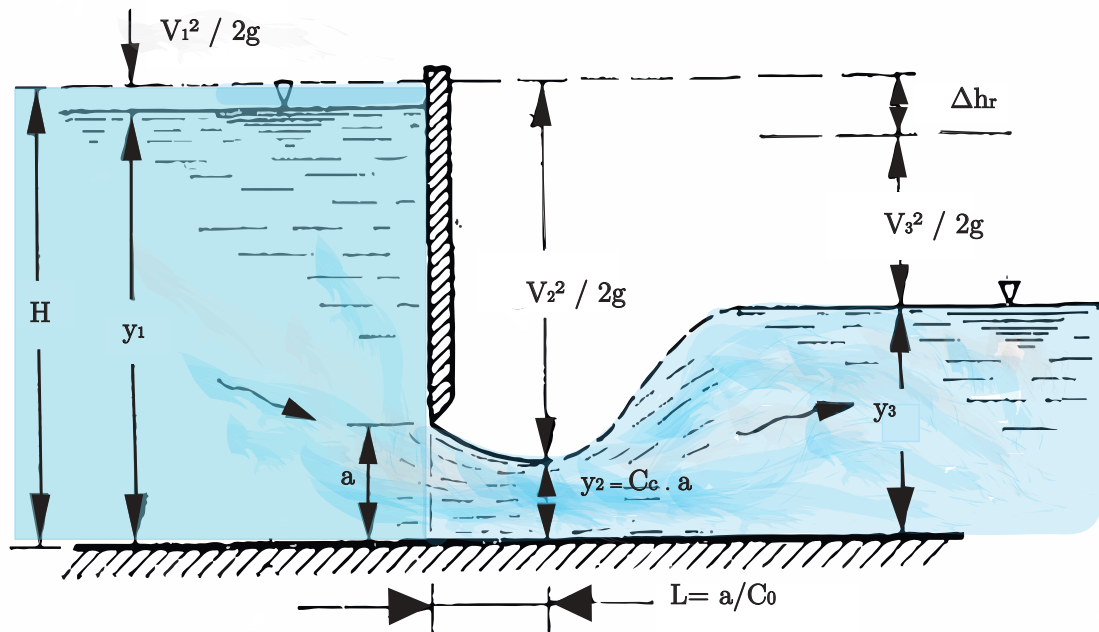


Figura 1.8: Compuerta plana. Fuente: [13]

La red de flujo de una compuerta plana permite explicar con claridad la contracción que experimenta el chorro descargado por el orificio de altura "a", hasta alcanzar un valor  $C_c \cdot a$  en una distancia "L" en la que las líneas de corriente se vuelven horizontales y tienden por ello a tener una distribución hidrostática de presiones. Debido al fenómeno de contracción y a la fricción con el piso, se produce una pérdida de carga  $\Delta h_r$  que influye en el cálculo del gasto. Asimismo, la carga de velocidad con que llega el agua en el canal, aguas arriba de la compuerta, tiene mayor importancia a medida que la relación  $\frac{z}{a}$  disminuye, siendo "z" el nivel de la laguna.

En el canto inferior de la compuerta las líneas de corriente tienden a unirse es ahí donde la velocidad adquiere su máximo valor. Debido a la curvatura de las líneas de corriente una gran presión actúa sobre la línea de intersección del plano de la compuerta, razón por la cual se tiene una velocidad pequeña.

### 1.5.2. Salto de agua

Se entiende por salto de agua al paso violento o descenso de masas de agua desde un nivel, más o menos constante, a otro inmediatamente menor. El agua retenida en el embalse constituye energía potencial, que al caer de un nivel superior a otro inferior por medio

de conductos, muda en energía cinética. A su vez, esta última se transforma en energía mecánica a través de la turbina.

### **Salto bruto, real o total**

Se expresa mediante la letra  $\bar{H}$  y representa la diferencia entre el nivel de la superficie del agua retenida y el nivel, en apariencia uniforme, de la corriente de agua que se establece una vez que la misma haya transitado las conducciones que salvan el salto de agua.

En este trabajo el salto bruto variará constantemente dependiendo de la evolución hidrológica de la laguna, la estación del año, precipitaciones, entre otros factores.

### **Salto útil o neto**

Se representa con la letra  $y_1$ . Este salto surge de restarle al valor del salto bruto, las pérdidas de carga o altura que surgen en la totalidad del trayecto. Se puede ver en la figura 1.8. Las pérdidas pueden tener origen en las turbulencias y rozamientos del agua en los ingresos de las tuberías, válvulas, modificaciones de sección, etc [5].

### **Capacidad útil**

Recibe el nombre de capacidad útil, la capacidad de agua embalsada que supera el ingreso de agua hacia la central. Es el volumen de agua disponible para cubrir la demanda de la instalación a la cual pertenece el embalse.

### **Capacidad total**

Se denomina capacidad total a la totalidad del volumen de agua retenida, o sea, la capacidad útil más la no utilizable. La capacidad de un embalse, se expresa en  $[m^3]$ . La evaporación que se da en la superficie y las filtraciones ocurridas en el terreno son algunas de las causas naturales que originan pérdidas de agua en los embalses. Para un correcto mantenimiento de los embalses requiere una inspección constante, con el propósito de:

- Retirar los cuerpos extraños.
- Corroborar la existencia de desprendimientos de terreno.
- Inspeccionar los acarrees del fondo.

### **1.5.3. Orificios y compuertas**

En el proyecto, el embalse se realiza mediante una presa y compuerta de desagüe donde se desea calcular de forma estimativa el caudal de descarga.

En principio, se considera un orificio de descarga de pequeñas dimensiones y un área cualquiera " $A_i$ " y el orificio descarga un gasto " $Q$ " cuya magnitud se desea calcular, para lo cual se supone que el nivel del agua en el recipiente permanece constante por efecto de la entrada de un gasto idéntico al que sale; o bien porque posea un volumen muy grande.

Las partículas de líquido al centro del mismo, de modo que, por efecto de su inercia, la deflexión brusca que sufren produce una contracción del chorro, esta nueva sección se la llama contraída y tiene un área " $A_c$ " inferior al área " $A_i$ " del orificio. En ella las velocidades de las partículas son prácticamente uniformes y con un valor medio " $\bar{V}$ ".

Considerando una distribución uniforme de velocidades y que el plano de referencia coincida con el centro del orificio utilizando la carga hidráulica " $H$ " se utiliza la ecuación de Torricelli:

$$\bar{V} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (1.2)$$

Esta expresión puede también obtenerse aplicando la ecuación de Bernoulli entre una sección, aguas arriba, próxima al orificio y, otra, aguas abajo, en el chorro de salida.

La ecuación 1.2 indica que la velocidad sigue una ley parabólica con la profundidad y en este caso la velocidad media  $V$ , se calcula con la profundidad media del orificio y corresponde a su centro de gravedad, no obstante que las velocidades de las partículas arriba de este punto son menores y, abajo, mayores. Esto tendrá por supuesto mayor validez a medida que la dimensión transversal, no horizontal, del orificio sea mucho menor que la profundidad  $H$  del mismo [15].

Los resultados obtenidos de la Ec. 1.2 concuerdan con los obtenidos experimentalmente sólo si se corrigen, mediante un coeficiente  $C_v$  llamado de velocidad expresado en la 1.3:

$$\bar{V} = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (1.3)$$

donde  $C_v$ , coeficiente sin dimensiones muy próximo a 1, es de tipo experimental.

El área de la sección contraída  $A_c$  puede expresarse como una función del área del orificio  $A$  en la forma:

$$A_c = C_c \cdot A \quad (1.4)$$

en donde  $C_c$  es un coeficiente adimensional de contracción.

Entonces, el gasto descargado puede expresarse como:

$$\bar{V} = C_v \cdot C_c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (1.5)$$

Si se define  $C_{d0} = C_v \cdot C_c$  como un coeficiente de descarga, el gasto se puede calcular como:

$$\bar{V} = C_{d0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (1.6)$$

Por lo tanto, la descarga para un orificio de pared delgada será:

$$Q = A \cdot C_{d0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (1.7)$$

Para determinar los coeficientes de velocidad y contracción debe calcularse el número de Reynolds para la compuerta. Para compuertas rectangulares y de poca altura se puede utilizar la ecuación para obtenerlo, aunque solo es válida para orificios de contracción completa:

$$Re = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot a}{\nu} \quad (1.8)$$

Siendo  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua ( $1,004 \frac{mm^2}{s}$ ). Luego con la ayuda de la figura 1.9 es posible determinar el coeficiente de gasto.

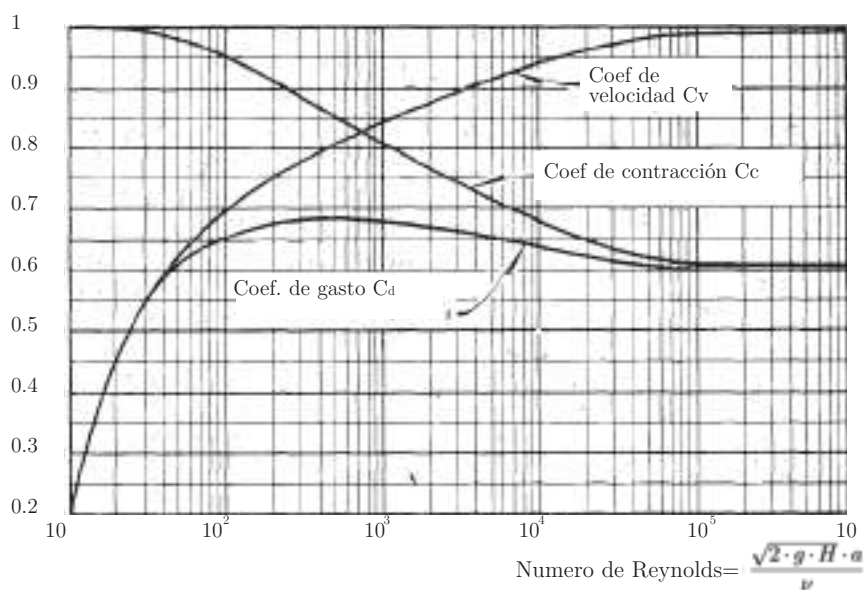


Figura 1.9: Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto. Fuente: [13]

Conviene aclarar que en las ecuaciones anteriores se consideró "H" como el desnivel entre la superficie libre y el centro de gravedad del orificio. Esto resultó de suponer que

era despreciable la velocidad de llegada al orificio y que la presión sobre la superficie libre corresponde a la atmosférica [13].

### Orificios de grandes dimensiones o poca carga

En el caso particular del presente proyecto, el comportamiento de la compuerta no puede tratarse como lo explicado anteriormente debido a que es un orificio de grandes dimensiones que modifica el comportamiento fluidodinámico. Esto quiere decir que la velocidad media de todas las partículas no puede ser calculada a partir de la energía potencias de  $H$  hasta el centro del orificio, como en las pequeñas perforaciones. Resulta conveniente investigar lo que sucede cuando el orificio es de grandes dimensiones y se encuentra a poca profundidad. Debe considerarse un orificio de forma cualquiera practicado en la pared vertical de un recipiente y la notación como en la figura 1.10:

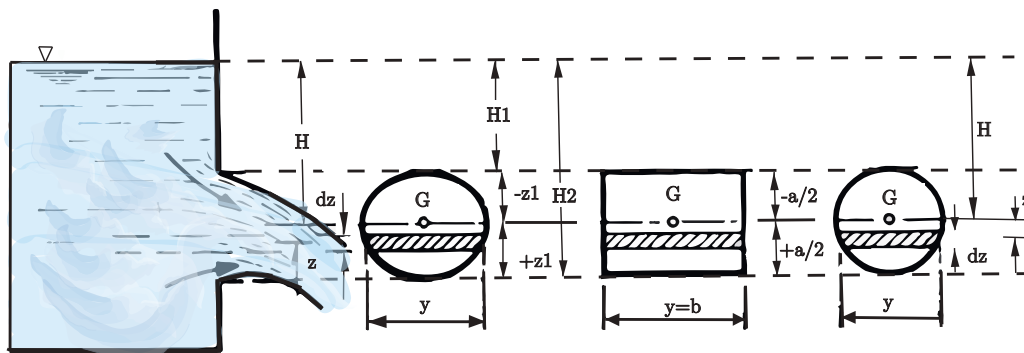


Figura 1.10: Esquema de compuerta. *Orificios de grandes dimensiones o poca carga* [13]

De acuerdo con la ecuación 1.7 el gasto que pasa por un elemento diferencial de área es:

$$dQ' = C_{d0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H + z)} \cdot y \cdot dz \tag{1.9}$$

desarrollando [13], puede obtenerse la relación entre el caudal real y teórico calculado. Para el orificio rectangular,  $y = b$  (constante),  $Z_1 = z_2 = \frac{a}{2}$ ; el valor de  $\phi$  será:

$$\phi = \frac{Q'}{Q} = 1 - \frac{1}{96} \cdot \left[\frac{a}{H}\right]^2 \quad (1.10)$$

El valor  $a/H = D/H = 2$  equivale al caso extremo en el que el nivel del agua en el recipiente coincide con el canto superior del orificio. En dichas condiciones el orificio no funciona como tal, sino como un vertedor de pared delgada [13].

### Orificios con contracción incompleta

Se puede hablar de dos tipos de contracción incompleta en un orificio.

1. Cuando las paredes o el fondo del recipiente se encuentran a distancias inferiores a  $3D$  ( $D$  es el diámetro de los orificios) o bien, a  $3a$  (" $a$ ": dimensión mínima en orificios rectangulares), se dice que la contracción en el orificio es parcialmente suprimida.
2. Si se llega al caso extremo en que una de las fronteras del recipiente coincida con una arista del orificio, se dice que la contracción es suprimida en esa arista

Cabe destacar, que la compuerta a estudiar se ubica a una distancia menos a  $3 \cdot a$  pero no al ras del fondo de la laguna. En este caso particular, el procedimiento fue tomar un muestreo de 35 medidas en distintos puntos del brazo de desagüe para determinar la morfología del fondo. Se observó que al no haber una cementación del lado de la laguna se originaba un pozo en la cercanía de la compuerta que alcanzaba entre 40 y 65 cm de profundidad medida desde la cota inferior de la compuerta.

En el caso de contracción parcialmente suprimida, se puede utilizar la siguiente ecuación empírica para calcular el coeficiente de gasto:

$$C_d = C_{d0} \cdot \left[1 + 0,641 \cdot \left(\frac{A_0}{A_t}\right)^2\right] \quad (1.11)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones 1.7, 1.10 y 1.11 la expresión para un orificio rectangular. con contracción parcialmente suprimida y de grandes dimensiones es:

$$Q_c = A \cdot C_{d0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot \phi \cdot \left[1 + 0,641 \cdot \left(\frac{A_0}{A_t}\right)^2\right] \quad (1.12)$$

donde donde  $C_d$  es el coeficiente de gasto del orificio,  $C_{d0}$  el coeficiente de gasto del mismo orificio con contracción completa,  $A_0$  el área del orificio;  $A_t$  el área de la pared del recipiente en contacto con el agua y  $Q_c$  es la descarga de la compuerta a estudiar.

## 1.6. Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAH)

Por supuesto no hay forma de generación eléctrica que no tenga un impacto ambiental de mayor o menor severidad, y las grandes hidroeléctricas (y las renovables en general) no son la excepción. Ciertamente la magnitud del impacto que los grandes aprovechamientos de uso múltiple plantean al medio natural, económico y social afectado, amerita que (y así lo establece la legislación) su estudio, proyecto y construcción queden siempre supeditados a la racional explotación y preservación de todos los recursos naturales vinculados a la cuenca hídrica en la que se hallan emplazados, como también al juicioso tratamiento de toda la problemática vinculado con ellos (manejo del agua, destino de la energía, control de inundaciones, seguridad de presas etc.) Entre las principales desventajas y/o objeciones de orden económico y ambiental que los aprovechamientos hidroeléctricos deben enfrentar es oportuno citar:

- Mayor costo unitario ( $\frac{US\$}{kW}$ ) que otro tipo de centrales.
- Mayores períodos de estudio y construcción.
- Posible inundación de áreas ribereñas.
- Eventual relocalización de poblados.

Un pequeño aprovechamiento comprende una central hidroeléctrica de pequeña escala que (dependiendo de su potencia) puede abastecer de energía tanto a la red pública como a una pequeña vivienda o establecimiento rural alejado de la red de distribución. En este sentido, los pequeños aprovechamientos se caracterizan por no requerir los prolongados estudios técnicos, económicos y ambientales asociados a los grandes proyectos, y se pueden iniciar y completar más rápidamente, lo que los torna una opción de abastecimiento viable en aquellas zonas y regiones del país no servidas aún por sistemas convencionales.

De ahí que no existe oposición entre aprovechamientos grandes y pequeños. Mientras los “grandes” abastecen el extenso sistema interconectado, los pequeños proveen electricidad a zonas remotas de una manera comparativamente económica y ambientalmente benigna. Igualmente, y dado el hecho que los pequeños aprovechamientos carecen (en general) de un gran reservorio, su impacto ambiental es también comparativamente reducido. Muchos emplean incluso embalses formados originalmente con otros propósitos.

Central	Provincia	Nº de maq	Pot Nominal [kW]	Generación anual [MWh]
Pueblo Viejo	Tucuman	2	15000	57602
Piedras Moras	Córdoba	1	6300	42285
Fitz Simon	Córdoba	3	10800	57800
Los quiroga	S. Estero	2	2000	11309
Saltito II	Misiones	2	640	2525
Puerto Moreno	Rio Negro	2	360	459
Rio Pico	Chubut	1	180	992
Valle Grande	Jujuy	1	48	112

Tabla 1.3: Pequeños aprovechamientos hidráulicos en Argentina *Instalaciones representativas*

Por supuesto no existe una convención única e internacionalmente aceptada que determine que aprovechamiento es o no pequeño, y cada país adopta su propia definición.

### 1.6.1. principales ventajas de los PAH

La sustentabilidad de los grandes embalses en cambio, es un tema debatido entre los especialistas y depende sobremanera de la definición que se tenga de ella. En cualquier caso entre las ventajas que reporta la generación hidroeléctrica es posible señalar:

- Generación limpia, económica (no hay costo de combustible) e inagotable.
- Sustitución de combustibles fósiles y ahorro de sus emisiones contaminantes.
- Posibilidad de beneficios adicionales como riego, agua potable, turismo y recreación, además de la generación de electricidad.
- Larga vida útil.
- Empleo de recursos y mano de obra nacionales. Tanto la construcción de las obras civiles como del equipamiento hidro-electromecánico puede ser encomendado a empresas argentinas. Su operación requiere poco personal.

En comparación con los grandes proyectos y en virtud de sus características de generación distribuida, los pequeños aprovechamientos pueden representar:

- Diferimiento o aplazos de extensiones de líneas de media y alta tensión y sus pérdidas inherentes.
- Mayor fiabilidad de la red (regulación de tensión / generación en puntas de línea).



- Menores períodos de gestación y construcción.
- Menores montos globales de inversión.
- Menor impacto ambiental.
- Posibilidad de fomento al desarrollo local.
- Posibilidad de calificar proyectos para el mercado mundial de bonos de carbono en emisiones evitadas de gases de efecto invernadero (GEI) vigente con el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto [4].

En términos sociales, las centrales hidroeléctricas de pequeña escala contribuyen al mejoramiento de la calidad de vida, abasteciendo de energía eléctrica a los hogares, centros de asistencia médica, educación, agua entubada o potable por bombeo, comunicación, recreación, seguridad, captación y otros.

En términos ambientales, la energía eléctrica proveniente de centrales hidroeléctricas de pequeña escala favorece, principalmente, en la disminución del consumo de productos derivados del petróleo, carbón y leña, reduciendo con ello las emisiones de gases de efecto invernadero.

En términos económicos, el principal beneficio de la energía eléctrica es los beneficios en cuanto a la generación mencionados anteriormente junto a la activación del sector productivo, comercial e industrial, siendo partícipe de la generación de empleos y negocios de pequeña, mediana y gran escala, como mercados municipales y comunales, turismo, etc.

## 1.7. Centrales eléctricas

Las centrales constan de dos partes principales con dos funciones claramente diferenciables. Se dividen en dos grupos:

- A: Las centrales hidroeléctricas están compuestas por todo tipo de obras, equipamientos, etc; que tienen como función almacenar y encaminar el agua para lograr una acción mecánica.
- B: El segundo grupo está compuesto por los edificios, equipos, sistemas, etc., cuya misión es la obtención de energía eléctrica luego de las necesarias transformaciones de la energía.

Este conjunto constituye la central y abarca: turbinas hidráulicas; alternadores; transformadores; sistemas eléctricos de media, alta y muy alta tensión; sistema eléctrico de baja tensión; sistema eléctrico de baja tensión; sistema eléctrico de corriente continua; medios auxiliares y cuadros de control.

Existen centrales hidroeléctricas de diferentes escalas, varían según su concepción arquitectónica, su régimen de flujo y la altura de caída del agua.

Las partes y funcionamiento de todas las centrales hidroeléctricas poseen los mismos principios. El funcionamiento inicia por la captación del agua por medio de una bocatoma de derivación si es un río o una compuerta en caso de embalse. El agua debe filtrar parte de los sólidos a través de un desarenador o rejillas para luego llegar a la cámara de carga, donde se despachará finalmente a la turbina.

### 1.7.1. Presa

Una presa es una estructura cuya función es servir de barrera, impidiendo el curso del agua por sus cauces normales. Su disposición está condicionada al relieve del lugar de emplazamiento.

Las presas tienen un doble propósito [5]:

- La creación de un salto. Cuanto mayor sea la altura de éste, superiores serán las potencias logradas en la central nutrida por dicho salto.
- La construcción de un depósito con el fin de almacenar y controlar el empleo del agua.

Todos los elementos de las obras de toma se deben planear para operar adecuadamente bajo las condiciones particulares del lugar de la captación seleccionado; es decir que las elevaciones, las pendientes y alineamiento, los determinarán factores morfológicos y de diseño, entre otros se tienen: las cargas de operación, la capacidad de explotación requerida, la localización y la elevación del agua en la descarga, condiciones del subsuelo, topografía del lugar, etc.

Dependiendo del diseño particular en cada presa, la obra de toma debe corresponder a la cimentación, descargas demandadas, cargas de operación, variación de niveles en el embalse y cantidad de sólidos flotantes o azolve que puedan ingresar al vaso durante su vida útil. En este proyecto, se cuenta con la ventaja que la obra civil ya existe, por lo tanto cualquier modificación o cambio se haga será más económico que realizar la obra desde un principio.

Se llama "NAME" al nivel máximo de almacenamiento con las compuertas del vertedor de excedencia completamente cerradas, su elevación es igual a la elevación de la cresta vertedora, más la carga sobre el vertedor. De la misma forma se llama NAMin a el nivel o cota de agua mínimo de operación en el cuerpo de agua, en el lugar donde se encuentra la captación, y corresponde al volumen destinado a los azolves.

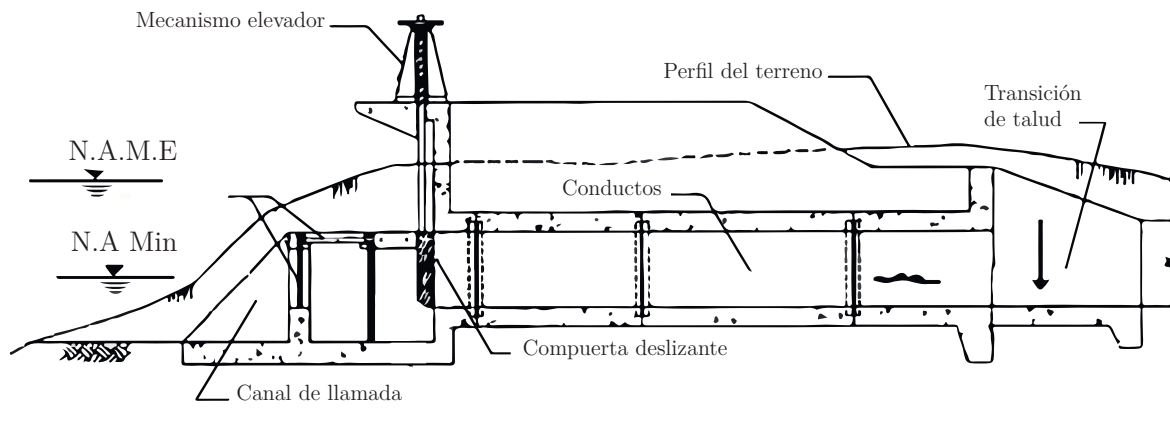


Figura 1.11: Obra de toma de agua embalsada. Fuente: [5]

En el paramento aguas arriba de la cortina se localiza la estructura de soporte de las rejillas de protección en cuyo interior se aloja la compuerta deslizante, la cual es operada desde la corona de la cortina. Toda la obra de toma deberá estar cimentada por debajo de la superficie de desplante de la presa y no en rellenos donde pueda ser dañada por asentamiento diferencial del terreno [20]. En cortinas bajas, las cimentaciones de la toma se aceptan en terrenos suaves, después de las investigaciones de su resistencia. Las rejillas evitan que cuerpos sólidos que arrastra la corriente ingresen a la toma de agua, evitando problemas tales como afectar los mecanismos de válvulas y compuertas ubicados aguas abajo.

### 1.7.2. Turbinas hidroeléctricas

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas). El agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua.

## Clasificación de turbomáquinas hidráulicas

Una primera clasificación de las turbomáquinas hidráulicas se puede hacer con arreglo a la función que desempeñan, en la forma siguiente:

1. Turbomáquinas motrices, que recogen la energía cedida por el fluido que las atraviesa, y la transforman en mecánica, pudiendo ser de dos tipos:
  - Dinámicas o cinéticas, Turbinas y ruedas hidráulicas
  - Estáticas o de presión, Celulares (paletas), de engranajes, helicoidales, etc
2. Turbomáquinas generatrices, que aumentan la energía del fluido que las atraviesa bajo forma potencial (aumento de presión), o cinética; la energía mecánica que consumen es suministrada por un motor, pudiendo ser:
  - Bombas de álabes, entre las que se encuentran las bombas centrífugas y axiales
  - Hélices marinas, cuyo principio es diferente a las anteriores; proporcionan un empuje sobre la carena de un buque
3. Turbomáquinas reversibles, tanto generatrices como motrices, que ejecutan una serie de funciones que quedan aseguradas, mediante un rotor específico, siendo las más importantes:
  - Grupos turbina-bomba, utilizados en centrales eléctricas de acumulación por bombeo
  - Grupos Bulbo, utilizados en la explotación de pequeños saltos y centrales maremotrices
4. Grupos de transmisión o acoplamiento, que son una combinación de máquinas motrices y generatrices, es decir, un acoplamiento (bomba-turbina), alimentadas en circuito cerrado por un fluido, en general aceite. A este grupo pertenecen los cambiadores de par.

Atendiendo a que la presión varíe o no en el rodete (ver figura 1.12), las turbinas se clasifican en :

1. Turbinas de acción o impulsión
2. Turbinas de reacción o sobrepresión

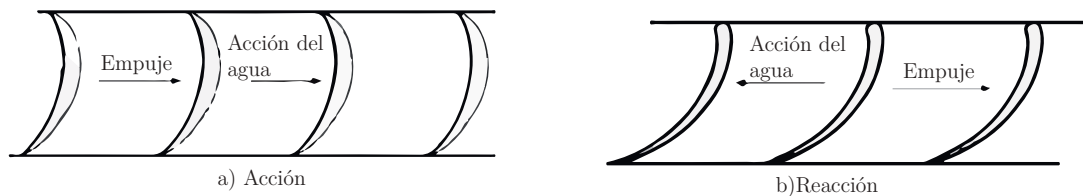


Figura 1.12: Turbinas de acción (a) y reacción (b). Fuente: [7]

En las turbinas de acción el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética.

En las turbinas de reacción el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión.

En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua, coinciden, mientras que en las turbinas de reacción, el empuje y la acción del agua son opuestos. Este empuje es consecuencia de la diferencia de velocidades entre la entrada y la salida del agua en el rodete, según la proyección de la misma sobre la perpendicular al eje de giro.

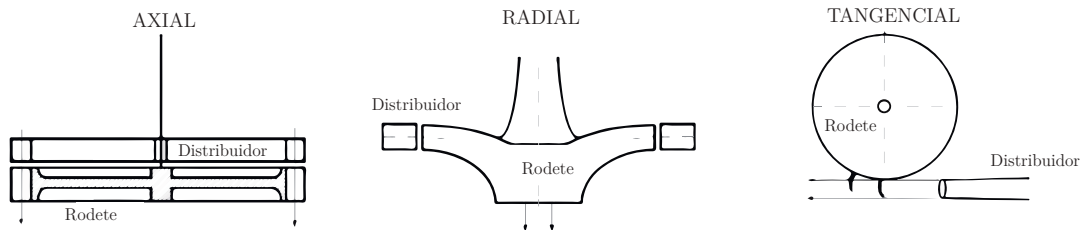


Figura 1.13: Turbinas axial (a) radial (b) y tangencial (c). Fuente: [7]

Atendiendo a la dirección de entrada del agua en las turbinas, éstas pueden clasificarse en (ver 1.13)

- Axiales
- Radiales (centrípetas y centrífugas)
- Mixtas
- Tangenciales

Por último, es posible clasificar de acuerdo a su comportamiento con caudal y altura, en la imagen 1.14 se pueden ver de acuerdo a estos parámetros aproximadamente cual turbina es la más adecuada.

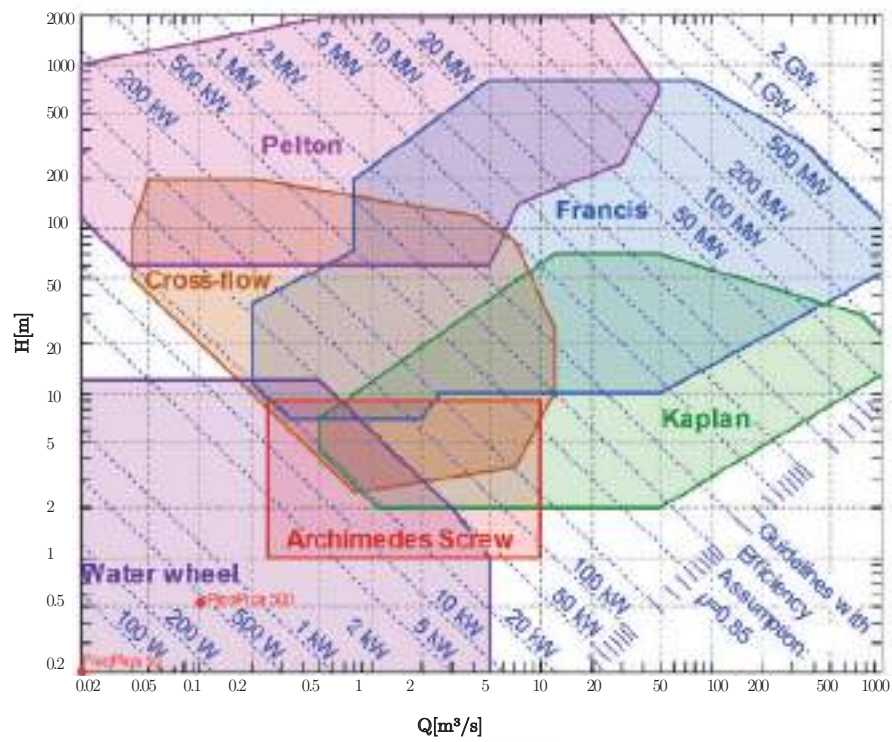


Figura 1.14: Esquema aproximado de clasificación de turbinas para un comportamiento adecuado de acuerdo a caudal [ $m^3/s$ ] y altura [m]. Fuente: [25].

Figura	Turbina	Descripción
	Rueda	<p>Las ruedas hidráulicas son máquinas capaces de transformar la energía del agua, cinética o potencial, en energía mecánica de rotación. En ellas, la energía potencial del agua se transforma en energía mecánica.</p> <p>Las ruedas pueden ser movidas de la parte superior, media o por debajo por ejemplo en ríos. Su diámetro decrece con la altura "H" del salto de agua. Los cangilones crecen con el caudal. Los rendimientos son del orden del 50% debido a la gran cantidad de engranajes intermedios. El número de rpm es de 4 a 8. Las potencias son bajas, y suelen variar entre 5 y 15 [kW], siendo pequeñas si se las compara con las potencias de varios cientos de [MW] conseguidas en las turbinas.</p>
	Turbina Pelton	<p>Las turbinas Pelton (acción) son turbinas de chorro libre que se acomodan a la utilización de saltos de agua con mucho desnivel y caudales relativamente pequeños, ver figura ??, con márgenes de empleo entre 60 y 1500 [m], consiguiéndose rendimientos máximos del orden del 90%.</p>

Tabla 1.4: Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7]



 <p>Diagrama de una turbina Francis. Se muestran las partes principales: el alternador en la parte superior, el rotor central con álabes orientables, y el tubo de aspiración en la parte inferior.</p>	<p>Turbinas Francis</p>	<p>Las turbinas Francis (reacción) son de tipo radial, admisión centrípeta y tubo de aspiración; siempre se construyen en condiciones de rendimiento máximo, dando lugar a tres tipos fundamentales, lentas, normales y rápidas, diferenciándose unas de otras en la forma del rodete.</p> <p>A medida que el fluido discurre a través del rodete, su momento angular se reduce e imparte un momento de torsión a la rueda, que a su vez impulsa el eje para producir energía. Gracias a sus álabes orientables tanto en el rodete como en el distribuidor, se puede operar con muy buena eficiencia dentro de un rango amplio de caudales debido a su doble regulación [21].</p> <p>A medida que el fluido discurre a través del rodete, su momento angular se reduce e imparte un momento de torsión a la rueda, que a su vez impulsa el eje para producir energía. Gracias a sus álabes orientables tanto en el rodete como en el distribuidor, se puede operar con muy buena eficiencia dentro de un rango amplio de caudales debido a su doble regulación [21].</p>
 <p>Diagrama de una turbina Kaplan. Se muestran las partes principales: el estator superior, el rotor con álabes regulables, el eje central, los portillos, las cuchillas y la entrada de agua lateral.</p>	<p>Turbinas Kaplan</p>	<p>Son turbinas de reacción de flujo axial. Los álabes del rodete en las Kaplan son siempre regulables, mientras que los de los distribuidores, pueden ser fijos o regulables.</p> <p>Para su regulación, los álabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manivelas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina.</p>

Tabla 1.5: Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7]

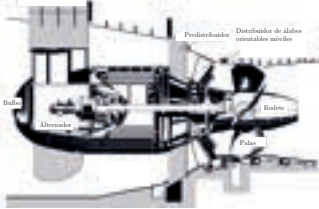
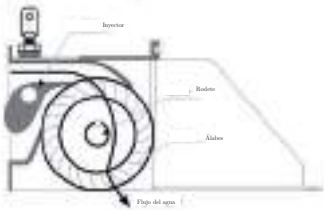
	Turbinas Bulbo-Kaplan	<p>Esta turbina (reacción) posee un rodete Kaplan y un distribuidor axial, pero la característica principal es que el generador se encuentra dentro del cubo, lo que constituye un ahorro de espacio del grupo ya que la extensión del eje resulta ser menor por lo que se obtiene un grupo más compacto, menor vibración del eje, además de ser más barato.</p> <p>Además de tener las palas orientables, ver figura ??, las turbinas funcionan en los dos sentidos de rotación (turbinas reversibles), y asimismo pueden actuar como bombas hélice accionadas por el propio generador [21].</p>
	Turbinas Turgo	<p>La turbina Turgo (acción) puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 15 y 300 metros. Como la Pelton, se trata de una turbina de acción, pero sus alabes tienen una distinta forma y disposición. A diferencia de la Pelton, en la turbina Turgo el chorro incide simultáneamente sobre varios alabes, de forma semejante a como lo hace el fluido en una turbina de vapor. Su menor diámetro conduce, para igual velocidad periférica, a una mayor velocidad angular, lo que facilita su acoplamiento directo al generador, con lo que al eliminar el multiplicador reduce el precio del grupo y aumenta su fiabilidad.</p>
	Turbinas de flujo cruzado o Michell-Banki	<p>Esta turbina (acción) es conocida también con los nombres de Michell-Banki, en recuerdo de sus inventores. Se utiliza con una gama muy amplia de caudales</p> <p>En este tipo de turbina, el agua entra en la turbina a través de un distribuidor, y pasa a través de la primera etapa de alabes del rodete, que funciona casi completamente sumergido. Después de pasar por esta primera etapa, el flujo cambia de sentido en el centro del rodete y vuelve a cruzarlo en una segunda etapa totalmente de acción.</p>

Tabla 1.6: Resumen de turbinas y sus características. Fuente: [7]

## Rendimiento de las turbinas

El rendimiento se define como la relación entre la potencia mecánica transmitida al eje de la turbina y la potencia hidráulica correspondiente al caudal y salto nominales.

En las turbinas de acción (Pelton y Turgo), la altura de salto se mide hasta el punto de impacto del chorro que, para evitar que el rodete quede sumergido en épocas de riadas, se encuentra siempre por encima del nivel de la lámina de agua en el canal de descarga.

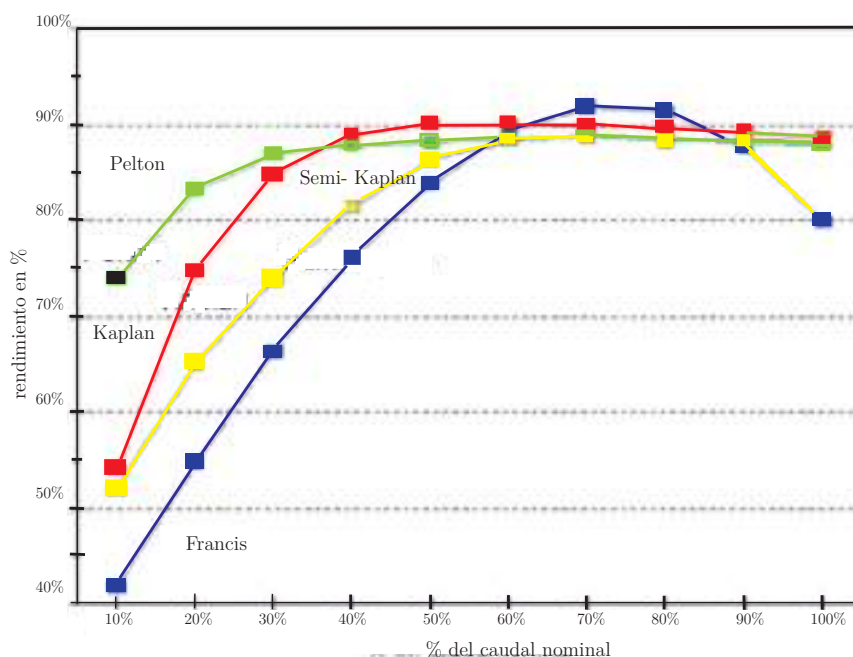


Figura 1.15: Curva de rendimiento de turbinas a carga parcial (Fuente: European Small Hydropower Association). Fuente: [22]

La figura 1.15 muestra las curvas de rendimiento en función del porcentaje de carga de caudal para distintos tipos de turbina. Para calcular el rendimiento global del grupo turbo-generador se debe multiplicar el de la turbina por el del multiplicador y por el del generador. La turbina se diseña para trabajar con el caudal nominal, para el que, en general, el rendimiento es máximo. Cuando el caudal se aleja de ese valor, tanto hacia arriba como hacia abajo, desciende el rendimiento, hasta que el caudal es inferior al mínimo técnico y la turbina no puede seguir funcionando.

### Limitación de aplicación de turbinas

Las centrales hidroeléctricas pueden ser diseñadas de diversas maneras, pudiendo cubrir la mayoría de los requerimientos para aprovechar la energía disponible en el sitio. No hay límite respecto del tamaño máximo de los emplazamientos útiles. Sin embargo, sí

existe una limitación en su aplicación para los sitios donde la altura es menor a la mínima de diseño.

Existen muchos emplazamientos que poseen gran caudal pero que por no contar con la altura de diseño mínima, no pueden ser aprovechados. Esto abre una oportunidad para buscar otras formas de conversión de la energía potencial del agua en energía eléctrica.

Esto junto a otras ventajas hace que resulte atractivo el análisis de la tecnología de generación de energía hidroeléctrica a partir de la rotación de un tornillo de Arquímedes [22].

## 1.8. Tornillo de Arquímedes

El uso del tornillo de Arquímedes para el aprovechamiento hidroeléctrico es muy reciente. Es una nueva y creciente alternativa, especialmente en Europa, donde las primeras instalaciones datan del año 1998. El uso del tornillo para propósitos hidroeléctricos fue propuesta por Radlick (Patente No. DE4139134C2 en Alemania, 1992) aunque hubo "sugerencias" para este uso como una rueda hidráulica por Ruhlmann en 1862.

Brada llevó a cabo la primer verificación experimental de la utilidad de generación mediante este tornillo entre 1993 y 1995 en la Universidad de Praga. Sus experimentos mostraron que un 80% aproximado de la energía potencial del agua podía ser transformada en energía mecánica con pequeños tornillos. Luego, Kleemann y Hellmann (2003) demostraron que se podrían llegar a eficiencias mayores para tornillos de mayor tamaño.

Hoy en día, los diámetros externos de los tornillos mas grandes no superan los 4 m; sin embargo el agrietamiento por fatiga en las soldaduras de las aletas con el diámetro interior no permiten aún un mayor tamaño. La eficiencia típica de agua a cable de los AST es tan alta como del 60% al 80%. Dependiendo de diseño del tornillo, instalación, condición de funcionamiento, así como la altura de llenado del tornillo, su mínimo y la máxima eficiencia puede diferir en diferentes condiciones (es decir, alturas de llenado y / o velocidades de rotación) para diferentes diseños. La generación de electricidad eficiente con solo unos metros de altura de agua y una amplia gama de tasas de flujo admitidas es una ventaja particular de los AST [22] que podrían aumentar la número de sitios potencialmente adecuados disponibles para el desarrollo de micro centrales hidroeléctricas.

Añadiendo a la alta eficiencia se suma el requisito de que las plantas hidroeléctricas en Europa sean fish-friendly, y se logra con este tipo de tecnología gracias a la poca velocidad rotación. Schmalz en (2010) verificó esta característica en investigaciones con migraciones de peces a través de varias plantas hidroeléctricas con turbinas Francis y tornillos de Arquímedes en Meiningen, Alemania. La mortalidad de los peces fue de 0 aunque algunos peces pequeños y menos activos perdieron algunas escamas o presentaron hematomas.



## Costos de operación y mantenimiento

Se espera que los costes generales de funcionamiento y mantenimiento de los TA sean inferiores a los de otras turbinas. El mantenimiento regular de TA incluye verificar los niveles de líquido y reemplazar los cartuchos de grasa en la parte superior cojinete y caja de cambios. Los cojinetes inferiores suelen estar diseñados para funcionar sin mantenimiento hasta el reemplazo. Tienen pocos puntos de desgaste y su velocidad operativa es baja, lo que reduce el daño. Los tipos comunes de erosión física y química ocurren solo en las aletas. Los tramos de tornillo normalmente se reacondicionan cuando el cojinete inferior y el canal se sustituye.

Dado que los costes de mantenimiento y funcionamiento de las AST son inferiores a los de otras micro turbinas hidroeléctricas, pueden considerarse como una de las mejores opciones para regiones no desarrolladas y áreas sin fácil acceso. Como altas elevaciones de montañas, o pequeñas comunidades que están lejos de instalaciones e infraestructura. Esta es una ventaja importante para las comunidades pequeñas donde conectarse a las redes centrales no es fácil ni rentable.

### 1.8.2. Ventajas sociales y para el medio ambiente

Cualquier perturbación en procesos naturales, incluida la construcción de estructuras hidráulicas, como pequeñas presas o desviaciones, también puede tener efectos secundarios. Los estudios indican que incluso las instalaciones hidroeléctricas de baja carga no están libres de riesgos especialmente para peces que migran río abajo.

Los golpes físicos son una fuente potencial de lesiones a los peces en todos los tipos de turbinas. Autores de varios estudios de simulación con peces sobre turbinas indicaron que minimizar las estructuras cerca de la cola de las turbinas de tornillo y operar turbinas de poca altura a potencias más altas con mayores aberturas de la hoja del corredor podría reducir la posibilidad de golpes.

Varios estudios han encontrado que el uso de TA podría limitar los impactos sobre la vida silvestre y las especies acuáticas. Los tornillos de Arquímedes incluso se utilizan como bombas para mover peces entre los corrales de sujeción en algunas granjas de peces con entre el 98% y el 99% de los peces ilesos durante el paso. Los resultados podrían ser similares en TA ya que ambos sistemas tienen velocidades de rotación lentas y grandes aberturas que permiten el paso seguro de objetos pequeños.

Investigaciones posteriores encontraron que la aplicación de un parachoques de goma al borde de ataque de las hojas de los tornillos redujeron aún más el potencial de lesiones. Otro estudio indica que los peces que pesan menos de 1 kg pueden pasar de manera segura a través de un TA que gira en su velocidad óptima. Una pauta de la práctica es que se recomienda el uso de topes de goma comprimibles para TA con un velocidad superior a  $3,5 \frac{m}{s}$ . También se deben usar rejillas de basura para filtrar los desechos más grandes

antes entrar en la turbina para una variedad de diámetros TA para bloquear el paso de peces y escombros que son más grandes que los baldes del TA y los desvían hacia un aliviadero o corriente paralela sin daño (en este proyecto eso es una gran ventaja debido a que la zona de toma es de libre circulación y existe basura de diverso tamaño así como pequeñas ramas y cañas propias de la flora de la zona).

También es notable que en comparación con otros tipos de turbinas, los TA permiten un mayor paso aguas abajo de sedimentos, escombros flotantes y otros materiales. Esta capacidad de pasar materiales más grandes significa que la basura, los bastidores y las cribas aguas arriba pueden ser más toscos y, por lo tanto, menos costosos, con menos pérdida de carga, que los necesario para otros tipos de turbinas [25].

### 1.8.3. Desventajas de generación con TA

Existen obviamente contras para la generación con un tornillo de Arquímedes entre ellas se pueden nombrar:

**Una tecnología relativamente "nueva"** Si se mira la historia del TA se podría decir que es relativamente nuevo, la primera instalación para generación data en los 90'. Por lo tanto, hay muchas cosas poco conocidas sobre los TA en comparación a otras tecnologías hidroeléctricas. Afortunadamente, los TA se han vuelto cada vez más populares en Europa durante la última década debido a su robustez, simplicidad y amabilidad con los peces, y hay una tasa creciente de interés de investigación para estas máquinas.

**Guía de diseño general insuficiente** Actualmente, no existe una teoría perfecta o normas o reglas generales para el diseño hidráulico óptimo. Sus plantas hidroeléctricas y diseños dependen en gran medida de la experiencia de los ingenieros diseñadores y datos experimentales. En la actualidad, Rorres y Nuernbergk y son conocidos por los procedimientos propuestos para el diseño óptimo de un TA [24] [23].

**Limitaciones técnicas** Para caudales o cabezales de agua muy altos, es posible que un solo tornillo no aproveche todos los potencial debido a limitaciones materiales, estructurales, técnicas y físicas: la flexión podría ser un problema grave para estructuras muy largas. Aumentar el diámetro interior del tornillo podría ayudar a aumentar la longitud del TA con el costo de agrandar el tornillo o reducir el área efectiva. Sin embargo, debido a la peso del tornillo, las limitaciones de los cojinetes es una de las limitaciones técnicas más críticas.

Los tornillos de Arquímedes operan a bajas velocidades de rotación en relación con otras turbinas hidroeléctricas. Esto proporciona ventajas medioambientales como un buen comportamiento ecológico y una reducción del ruido. Sin embargo, se requiere una caja de

cambios para convertir esta velocidad de rotación a la velocidad requerida del generador. Aunque esto no podría considerarse como un tema importante las pérdidas en la caja de cambios, así como el generador puede afectar la eficiencia general del sistema.

Los TA pueden manejar caudales incluso de hasta un 20% más que el llenado óptimo sin una pérdida significativa en eficiencia. Sin embargo, ejecutar tornillos en condiciones no óptimas, como alturas de llenado elevadas o velocidades de rotación superiores a la velocidad de rotación máxima pueden conducir a pérdidas importantes debido a limitaciones físicas e hidráulicas. Afortunadamente, existen algunas soluciones para lidiar con algunas de estas limitaciones. Cuando las condiciones no son perfectas para un solo tornillo, la instalación más de un tornillo, y el uso de TA de velocidad variable, permite aplicar este tipo de máquinas a una amplia variedad de sitios, incluidos aquellos con alta variabilidad estacional.

## 1.9. Conclusiones

Se han mencionado ciertos conceptos que son útiles para el análisis del siguiente trabajo. Se logró establecer un tipo de turbina que es el más adecuado y para las condiciones actuales de el presente proyecto. Esta información dió la base para un estudio detallado del comportamiento del desagüe y de las ventajas/desventajas de cada turbina.

Por último, se detalla la información de la turbina que finalmente se utilizará. Se detalló la historia de este tipo de aprovechamiento, sus utilidades y ventajas/desventajas.



# Capítulo 2

## Marco contextual

### 2.1. Introducción

Es necesario conocer donde está ubicado el aprovechamiento, es necesario realizar un análisis hidrológico de la laguna para saber si podrá ser útil como aprovechamiento de generación. En este capítulo se trata acerca del estudio de la zona, viendo los factores que podrían favorecer o presentar una desventaja para el objetivo de este trabajo.

### 2.2. localización del proyecto

El partido de General Pueyrredón se encuentra sobre el Océano Atlántico Sur, en la zona del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Abarca la ciudad de Mar del Plata y Batán, siendo la primera la cabecera del partido.

La ubicación del proyecto se encuentra en la naciente del arroyo "La Tapera". Este regato nace en el humedal Laguna de los Padres, como único efluente natural de la misma, actuando además en su naciente como nivelador de la cota de la Laguna de Los Padres, lo que hace que el mismo tenga un caudal fluctuante y dependiente del nivel de la laguna. En la figura 2.1 se muestra la ubicación geográfica la compuerta.

Recorre desde su naciente unos 25 Km, atravesando en la primera etapa de su curso la zona agrícola lindera a la ruta Nacional N° 226, donde también recibe el aporte de aguadas de origen pluvial, que se embalsa en los campos y mantienen en parte, el caudal en época de sequías. Después de recorrer aproximadamente 16 Km, penetra en la zona urbana atravesando la Ruta nacional N° 2 a la altura del aeroparque, Barrio La Florida.

Unos 10 Km aproximadamente recorre dentro del tejido urbano, hasta desembocar en el mar, a la altura del Parque Camet, dando lugar una laguna artificial, que forma parte del paisaje del parque y es usado como agua de recreación deportiva.

Este trayecto por la zona urbana, incluye zonas industriales, sectores de clase media alta y en la parte final de su recorrido, sectores de barrios marginales. Antes de entrar

en el Parque Camet, hay un canal de desagote directo al mar, cuyo recorrido recto, no coincide con el cause natural del arroyo; aunque no era su función original, actualmente cumple la función de canal aliviador.



Figura 2.1: Ubicación geográfica de nacimiento de arroyo "La Tapera". Fuente: Google Earth

La laguna de los padres es un cuerpo de agua de régimen permanente y somero con una superficie de  $2.16 (km)^2$  y una profundidad media de 1.24 m ( $38^\circ$  S;  $58^\circ$  W), situada en el Sistema Serrano de Tandilia [17]. Recibe un único afluente, el Arroyo de Los Padres y drena parte de sus aguas superficiales a través del Arroyo de La Tapera. Su cuenca ha sido labrada por deflación (acción erosiva del viento) en una época de clima árido. El nivel del agua ha permanecido constante hasta 1926, año en que se lleva a cabo la construcción de una compuerta o esclusa en la desembocadura de la laguna (Arroyo La Tapera) con el objeto de elevar y modificar artificialmente el nivel del espejo de agua.

### 2.3. Cuenca de los Padres

El área de estudio abarca la Cuenca de Laguna de Los Padres (ver figura 2.2), de  $102,6 (km)^2$ , cuyo principal asentamiento es Sierra de Los Padres, una localidad de aproximadamente 1600 habitantes permanentes. Enclavada en un ámbito periurbano, de sierras

y lagunas a 16 km de Mar del Plata, presenta potencialidades tales como el alto valor paisajístico y una conexión directa y rápida con dicha ciudad. El conocimiento de este sistema territorial se inicia con una caracterización preliminar de las condiciones biofísicas (enfaticando el sistema hídrico) y socioeconómicas (población y usos del suelo).

La alta dinámica demográfica y de ocupación territorial, dada por el incremento de población permanente y de la construcción edilicia, supone una demanda creciente del recurso agua, la cual proviene de un acuífero que es la única fuente de provisión regional.



Figura 2.2: Ubicación geográfica de la Cuenca de los Padres. *En base a Google Earth.*Fuente: [14].

Está situada en el cordón serrano conocido como Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires o Sistema de Tandilia, que representan una provincia fisiográfica que, con forma de cordón discontinuo de sierras, cerros y lomadas, emerge en la llanura pampeana bonaerense con orientación general Noroeste-Sudeste. De altura reducida (entre 50 y 250 m sobre el nivel de la llanura) las sierras se extienden por más de 300 km desde Mar del Plata hasta Olavarría; su ancho máximo es de cerca de 60 km en la zona de Tandil, ancho que disminuye en los extremos, a unos 6 km o menos [11].

## 2.4. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se constituye de una sucesión de procesos de almacenamiento y transferencia de agua. En la figura 2.3 se muestra un esquema del ciclo donde se pueden apreciar distintos procesos de almacenamiento y de transferencia:

Procesos de almacenamiento:

- Almacenamiento en la atmósfera.
- Almacenamiento de intercepción.
- Almacenamiento en depresiones.
- Almacenamiento en cauces.
- Almacenamiento en lagos y embalses.
- Humedad del suelo.
- Depósito de agua subterránea.

Procesos de transferencia:

- Precipitación.
- Infiltración.
- Escorrentía.
- Flujo subsuperficial.
- Flujo base.
- Flujo subterráneo.
- Evaporación.
- Transpiración.

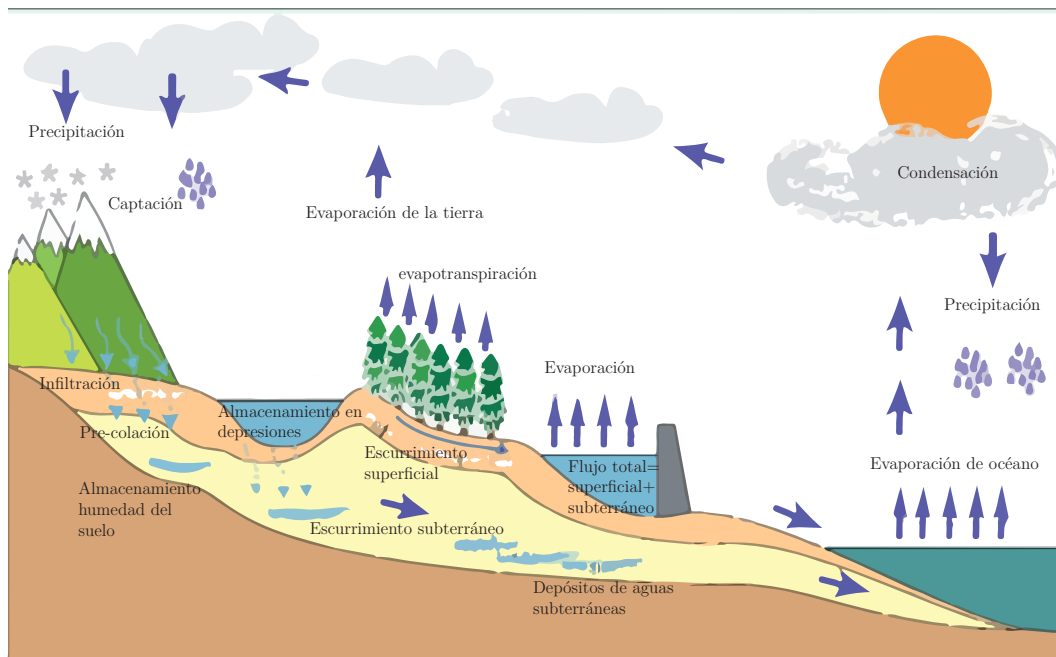


Figura 2.3: Ciclo Hidrológico. Fuente: [19]

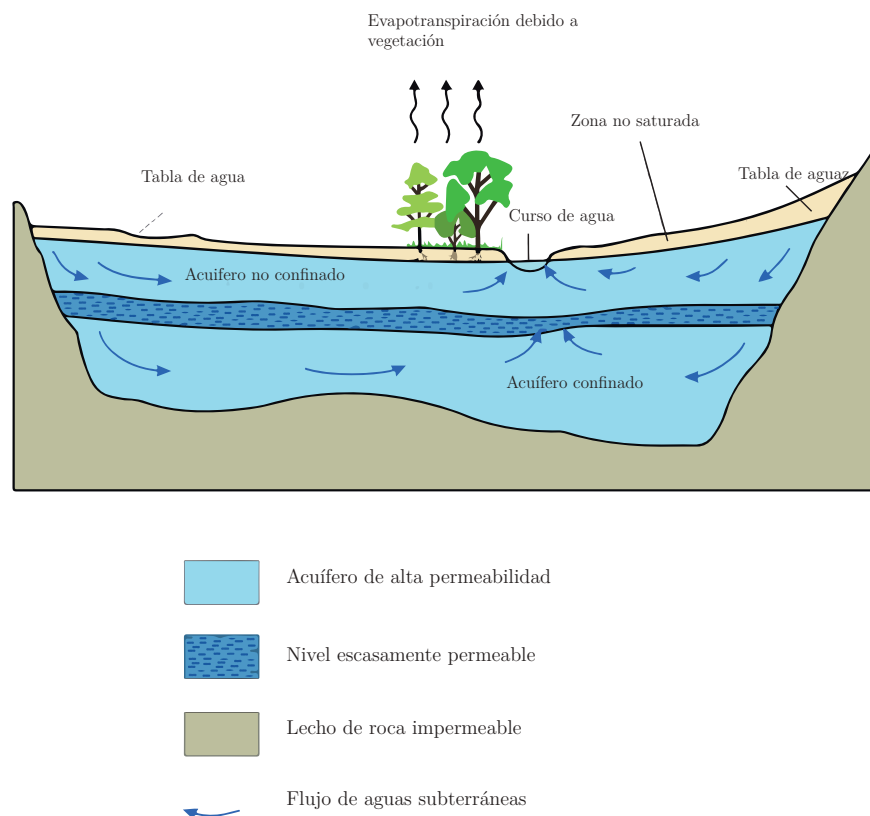


Figura 2.4: Circulación de agua en un acuífero. Fuente: [19]

Los cuerpos de agua superficial son parte activa de los sistemas de flujo del agua subterránea. La primera respuesta de la lluvia al tocar el suelo es la Infiltración. El agua infiltrada llena el déficit de capacidad de campo en la zona no saturada del suelo. El exceso de agua que sobrepasa sobre la capacidad de campo es la infiltración efectiva o recarga a los acuíferos que ocurre por gravedad.

Una vez que el agua infiltrada alcanza el nivel de agua subterránea ocurren los procesos de: a) Almacenamiento y b) Transmisión o flujo de agua subterránea. El acuífero es la unidad geológica o parte de ella que contiene agua y la transmiten en cantidades económicamente aprovechables. El agua en los acuíferos se encuentra contenida en los poros.

La mayor parte del agua subterránea está en movimiento lento continuo desde áreas de recarga natural (producto de la precipitación que excede los requerimientos de las plantas) hacia las áreas de descarga de los acuíferos (como manantiales e infiltración hacia cursos de agua, humedales y zonas costeras).

### 2.4.1. Red de drenaje

La red de drenaje y topografía se presentan en las figuras 2.5 y 2.6 respectivamente donde se ven todos los cauces y derivaciones cuyos cursos de agua son tanto permanentes como intermitentes escaso caudal. Generalmente se desarrollan en dirección SO-NE. El principal de la cuenca es el Arroyo de los Padres representado en la figura como un curso permanente de agua y unico afluente de la laguna.

La altura en la cuenca varía de 48 a 210 msnm (metros sobre el nivel del mar). Las mayores cotas corresponden al sector serrano, mientras que la menor cota se asocia a la laguna.

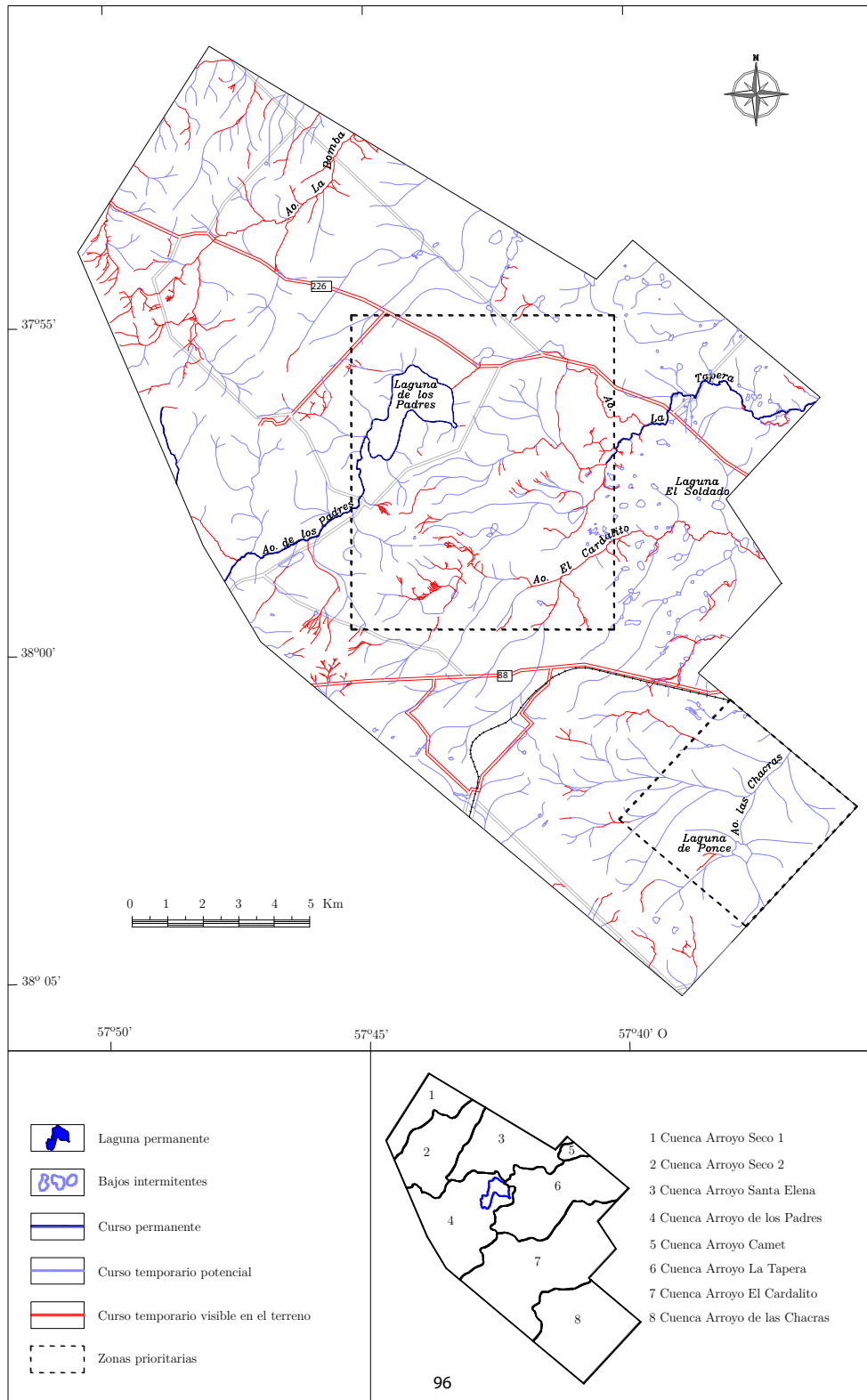


Figura 2.5: Red de drenaje. Fuente: [19]



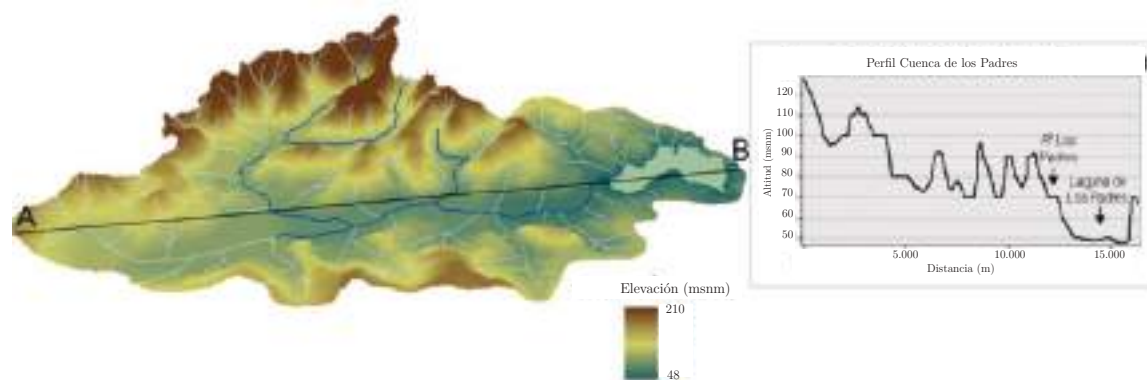


Figura 2.6: Perfil topográfico. Fuente: [19]

## 2.5. Laguna de los Padres

Las lagunas pampeanas se asientan sobre dos grandes unidades morfológicas, la llanura y los sistemas serranos. Son someras, de régimen permanente o temporario, con circulación continua de la columna de agua, dependientes del ciclo hidrológico, naturalmente eutróficas, de extensión y salinidad variable, y cuya distribución y morfometría está relacionada con el clima, el relieve y la geología.

Recibe un importante aporte subterráneo de las zonas topográficamente más altas, y a su vez, descargan subterráneamente un volumen significativo aguas abajo. El agua subterránea y su arroyo afluente constituyen las principales fuentes de recarga a este humedal, mientras que las descargas se producen a través del arroyo effluente y del acuífero [14].

La Laguna de Los Padres es una típica laguna pampeana localizada sobre el Sistema serrano de Tandilia, de régimen permanente, con un área:  $2.16 [km^2]$ , y una profundidad media de  $1.24 [m]$ . Posee un arroyo afluente y otro effluente y un comportamiento effluente-influente con el acuífero [19].

La regulación hídrica para desagote se realiza mediante una compuerta cuya ubicación se vé en la figura 2.1 en la naciente del arroyo effluente. La finalidad de esta es permitir un control del nivel de laguna y desagote de la misma garantizando un funcionamiento de "pulmon" si se lo requiriera para evitar desbordes aguas abajo o inundaciones como producto de excesivos caudales.

### **2.5.1. Morfometría de Laguna de los Padres**

Para la caracterización morfológica de la laguna se tuvo en cuenta trabajos y mediciones de los años 1970, 1998, 2002, 2004, 2005 y 2007 por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC-UNMdP/CIC), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC-CONICET/UNMdP) y FONCyT. Se consideraron las características más notorias de estos ecosistemas acuáticos: longitud máxima, ancho máximo y medio, perímetro, área, desarrollo de la línea de costa, profundidad, volumen.

En cuanto al área se muestra en la figura 2.7 como va variando en los distintos años y queda evidenciado en las mediciones del ancho y largo de la laguna. El crecimiento o la disminución varía de acuerdo a la época dependiendo principalmente de las precipitaciones. En el año 2002 y 2007 se nota un creciente aumento del area de la laguna por este mismo motivo.

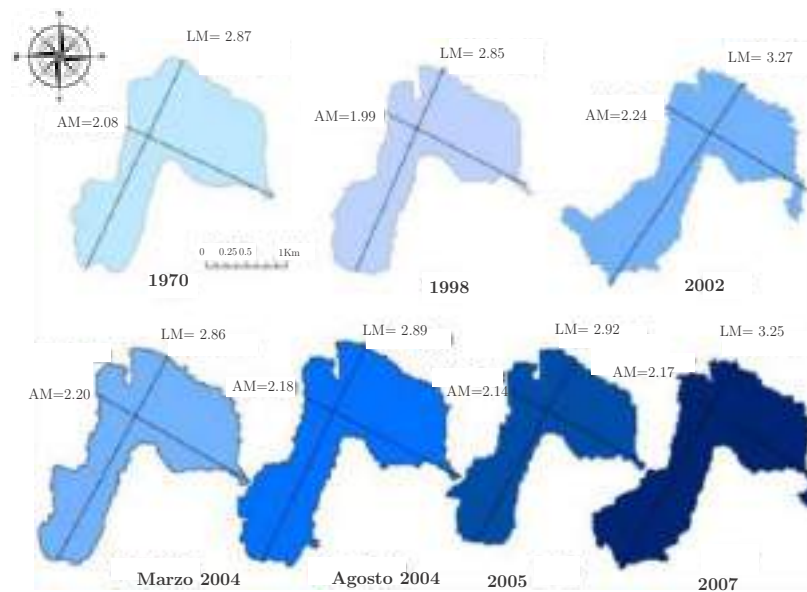


Figura 2.7: Representación areas. *LM:Largo medio*, *AM:Ancho medio*. Fuente: [19]

La laguna presenta un fondo regular con una depresión que puede llegar a superar los 2 metros, alcanzando un máximo de 2.1 metros y 1.80m de depresión promedio. En la figura 2.8 se puede observar las líneas que delimitan las profundidades.

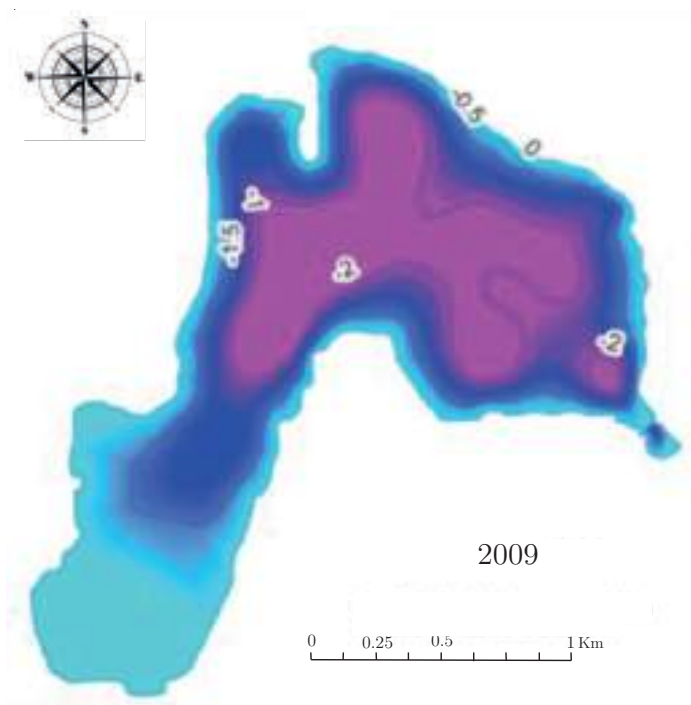


Figura 2.8: Mapa de profundidad de la laguna. *Unidad: msnm. 2009. Fuente: [19].*

Estas variaciones también afectan al volumen de agua contenido en la laguna, dependerá en gran medida de las precipitaciones y del manejo de la compuerta. En la figura 2.9 se puede ver la variación del volumen en estos años variando de 1.62 a 2.19 ( $hm$ )<sup>3</sup> con una media de 1.89 ( $hm$ )<sup>3</sup> [19].

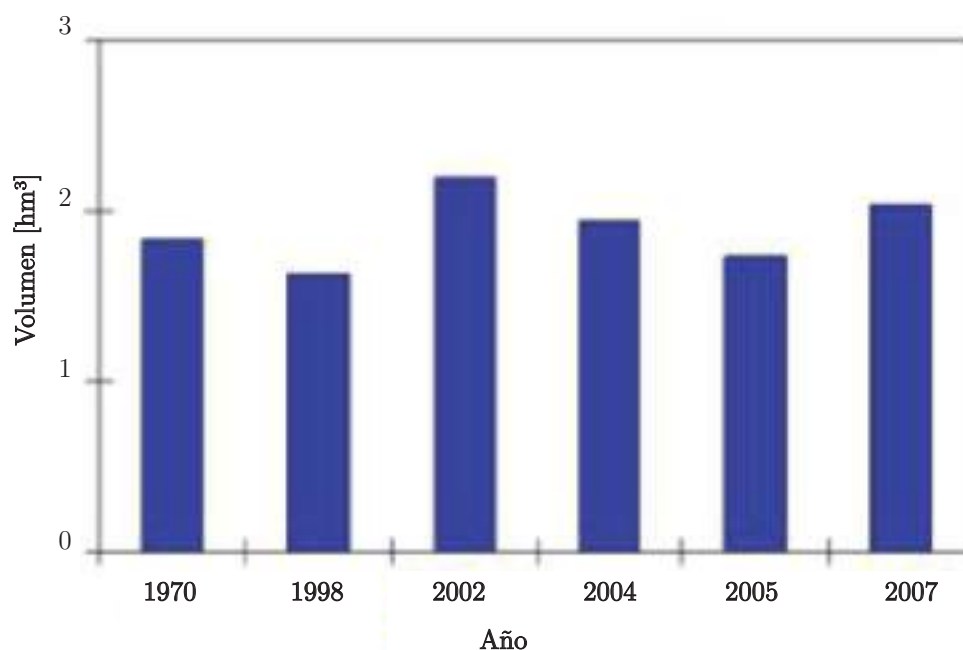


Figura 2.9: Volumen de la laguna a lo largo de los años. Unidad:  $hm^3$ . Fuente: [19].

## 2.6. Análisis hidrológico de la cuenca

Debido a que no se cuentan con aforos realizados en el arroyo effluente de "La Tapera" y que aunque los hubiera depende fundamentalmente de las crecidas y el régimen de manejo en la apertura de la compuerta, no es posible calcular o estimar un caudal de diseño para el proyecto.

Para este caso en particular, es necesario hacer un análisis hidrológico tomando como volumen de control la laguna. Para la Laguna de Los Padres, por su relación effluente-influente con el acuífero, las fuentes de recarga son el acuífero regional especialmente en el sector SW y el arroyo de Los Padres. En la figura 2.10 se aprecia el esquema de la laguna con sus entradas y salidas:

Se encuentra en una zona topográficamente baja, actuando como área de descarga tanto del agua superficial como subterránea de sus respectiva cuenca. Esta laguna en forma general, debe ser considerada como áreas de recarga al acuífero pampeano. Esto resulta de suma importancia ya que los humedales no sólo alimentan al sistema acuífero sino que también contribuyen con el mantenimiento de los niveles freáticos de su zona de influencia.

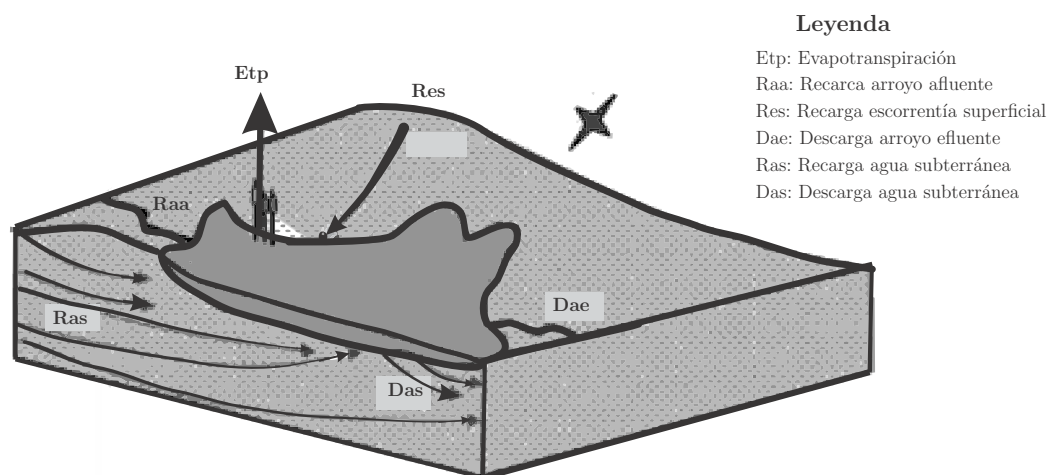


Figura 2.10: Modelo conceptual del funcionamiento hidrológico de la Laguna de los Padres. Fuente: [14].

Además, influyen sobre las características fisicoquímicas del agua subterránea filtrando sedimentos y posibles contaminantes (a través de su vegetación litoral) provenientes de las actividades desarrolladas en su cuenca de drenaje, influyendo sobre la calidad del agua para distintos usos [14].

La ecuación general del balance hídrico se expresa de la siguiente manera:

$$E = S \pm \Delta V \quad (2.1)$$

Donde:

E: Entradas totales (superficial, agua subterránea y precipitación). S: Salidas totales (superficial, agua subterránea y evaporación).  $\Delta V$ : Variación del volumen

Donde: De acuerdo con la naturaleza del balance hídrico, los lagos se pueden dividir en dos grandes categorías: abiertos (exorreicos), que son lagos con salida, y cerrados (endorreicos), que son lagos sin salida. Los lagos con una salida intermitente (efímera), durante los períodos de crecidas, constituyen una categoría intermedia [8].

Desarrollando un poco más la ecuación 2.1, para lagos y embalses y en cualquier intervalo de tiempo:

$$Q_{si} + Q_{ui} + P_l - E_l - Q_{so} - Q_{uo} \pm \Delta V_l = 0 \quad (2.2)$$

donde  $Q_{si}$  es el caudal de entrada de agua superficial dentro del lago o embalse;  $Q_{ui}$  es el flujo de entrada correspondiente al agua subterránea;  $P_l$  es la precipitación sobre la superficie del lago;  $E_l$  es la evaporación desde la superficie del lago;  $Q_{so}$  es el caudal de salida del agua superficial desde el lago o embalse;  $Q_{uo}$  es el flujo de salida de agua subterránea, incluyendo la filtración a través de la presa; y  $\Delta V_l$  es la variación del agua almacenada en el lago, durante el período del balance hídrico considerado.

Durante los últimos 20 años, los valores de precipitación anual han oscilado entre 587 y 1442  $\frac{mm}{año}$ , con una media de  $979 \pm 207 \frac{mm}{año}$ . La evapotranspiración potencial para el mismo período por el método Thornthwaite variaron de 696 a 766  $\frac{mm}{año}$ , con una media de  $732 \pm 26,87 \frac{mm}{año}$ .

**Fluctuaciones del nivel del agua del lago y corrientes de entrada** En cuanto a las variaciones del nivel de la laguna y del arroyo afluente los valores medios del nivel de agua fueron  $1,27 \pm 0,33$  y  $0,24 \pm 0,12$  (m) en el lago Los Padres y el flujo de entrada, respectivamente ( ver figura 2.11 (A)). La cantidad y frecuencia de las lluvias controlaban sistema hidrológico en la cuenca, evidenciando una alta dependencia del lago y del caudal de los niveles de los arroyos. El tiempo de retraso esperado entre el inicio de la lluvia y el inicio de la correspondiente subida del nivel de agua fue de 2 y 9 días para el arroyo "Los Padres" y el lago, respectivamente.

**Flujo base** Los datos de caudal diario registrados en el arroyo "Los Padres" permitieron permitieron a los autores [17] estimar la contribución de el agua subterránea a este curso de agua. Los valores de flujo base variaron de 46,75% ( $0,06 \frac{m^3}{s}$ ) a 100% ( $0,24 \frac{m^3}{s}$ ), con un valor medio de  $84,84 \pm 11,9\%$  ( $0,16 \pm 0,05 \frac{m^3}{s}$ ) a partir de marzo 2011 a marzo de 2012. La descarga de agua subterránea estacional al arroyo "Los Padres" fue mayor durante el invierno y el otoño en comparación con la primavera y el verano (2.11 (B)).

**Estimación isotópica de evaporación y tiempo de residencia del agua del lago** Se calcularon estimaciones mensuales de evaporación/corriente de entrada del agua del lago desde abril a noviembre de 2011. Las relaciones medias calculadas fueron  $0,25 \pm 0,14$  y  $0,20 \pm 0,10$  respectivamente; lo que indica que alrededor del 20-25% del agua del lago se perdió a través de la evaporación de la superficie del lago.

La variabilidad estacional en las relaciones fue evidente. El tiempo medio de residencia del agua en el lago Los Padres fue de  $1,11 \pm 0,65$  años.

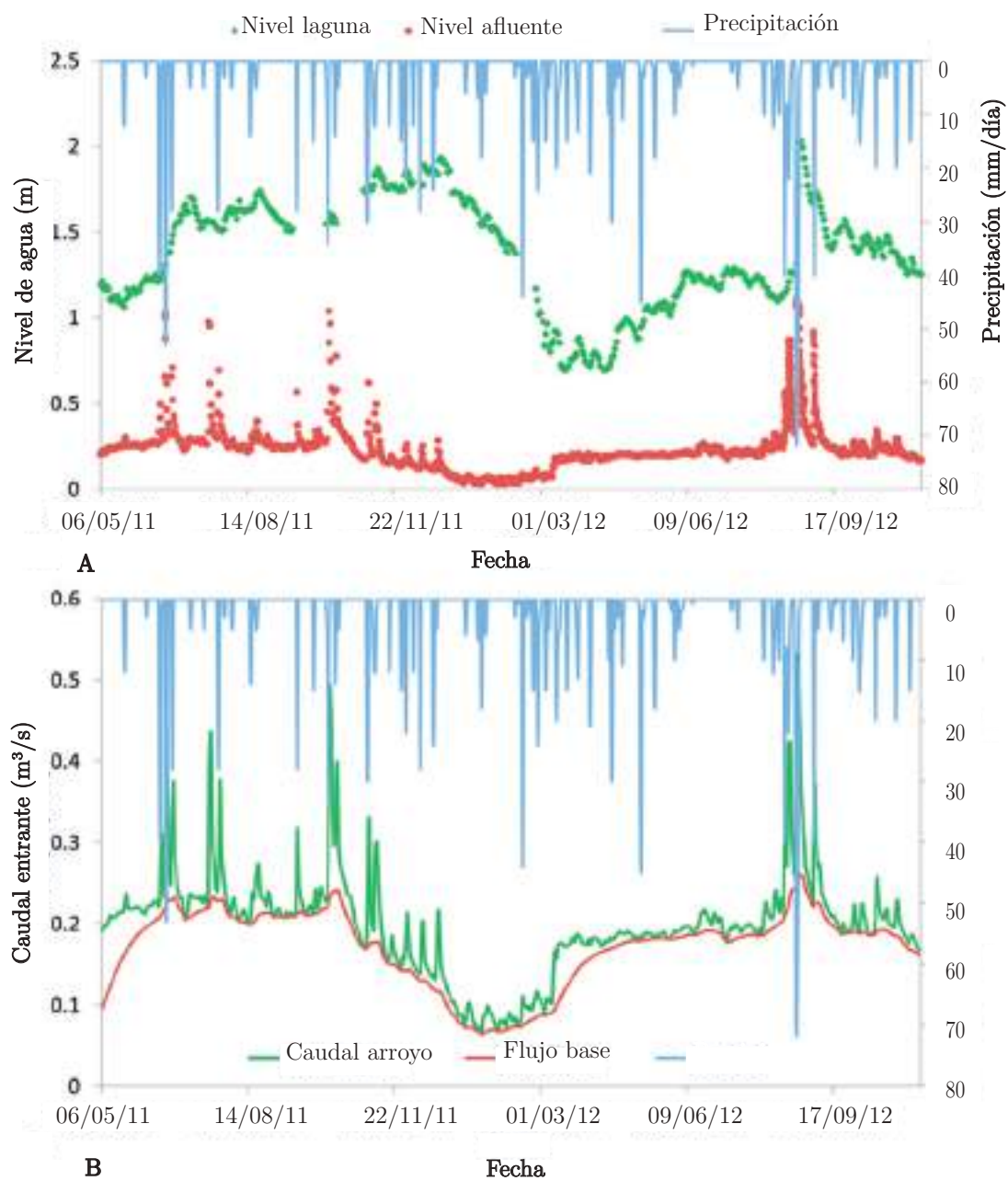


Figura 2.11: (A) Fluctuaciones del nivel del agua en el lago Los Padres y su flujo de entrada. (B) Variación temporal en lluvia, descarga de agua subterránea (flujo base) y caudal en el arroyo Los Padres. Fuente: [17].



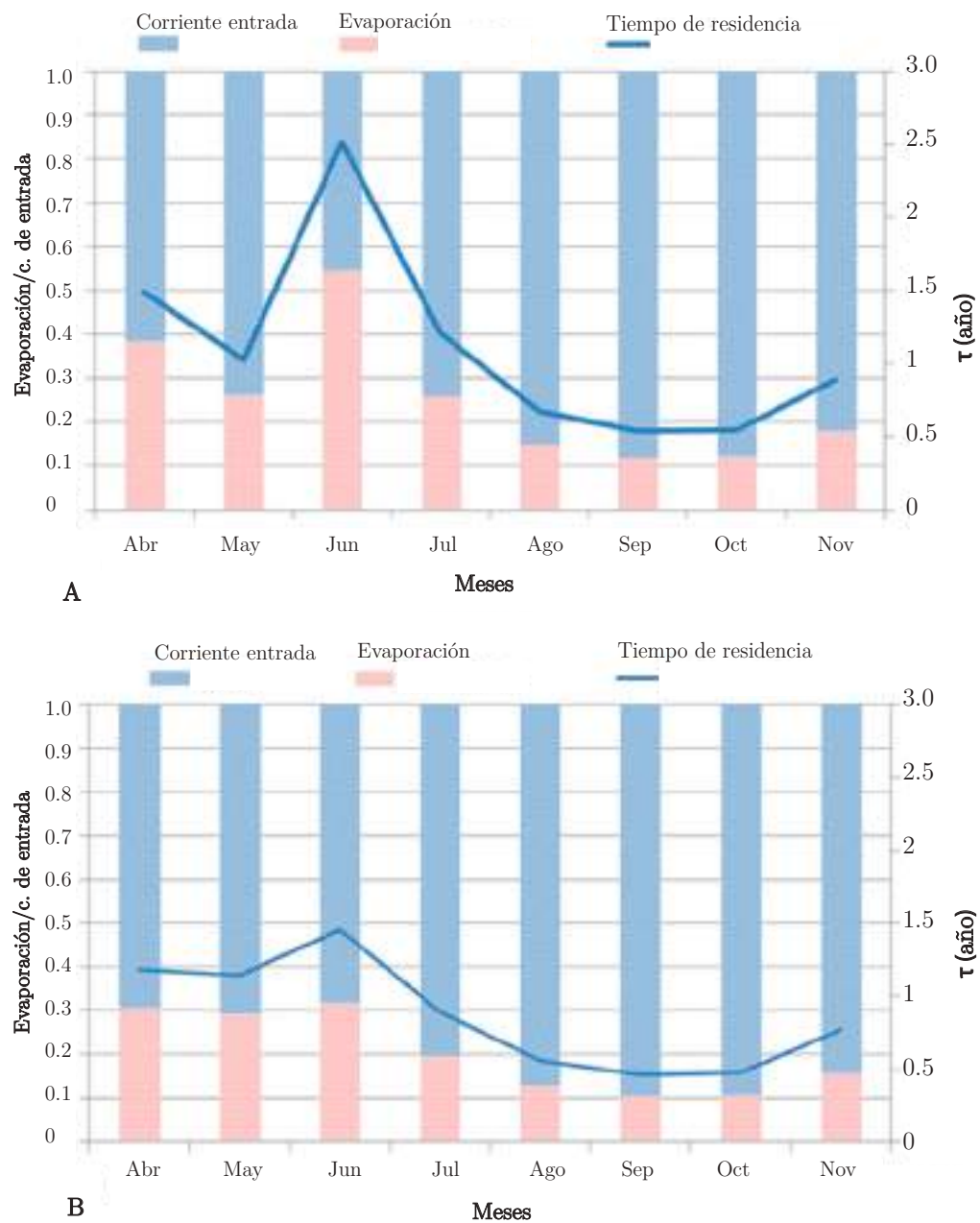


Figura 2.12: Proporción de las relaciones de evaporación a afluencia ( $E / I$ ) y tiempo de residencia ( $\tau$ ) en el lago Los Padres basado en los valores de isótopos A)  $\delta^2H$  y B)  $\delta^{18}O$ . Fuente: [17].

## 2.7. Conclusión y discusión de datos

El entorno hidrológico de la laguna refleja que la entrada se equilibra con la evaporación y la salida. Las relaciones evaporación / afluencia mensuales y el tiempo de residencia fueron dinámicos dentro del lago y proporcionaron estimación de las condiciones hidrológicas mensuales del lago para el análisis período. Las relaciones evaporación / afluencia mensuales calculadas fueron en su mayoría  $<0,4$ . En general, las relaciones mensuales parecían depender de la temperatura, excepto el valor obtenido en junio.

En conclusión la Laguna Los Padres ( $E / A \leq 0.4$ ) podría ser clasificado como un lago de flujo continuo, donde el 60% o más del flujo de entrada del lago fluye como afluente del mismo. Según este escenario hidrológico, la afluencia ( $I$ ) es continua y equilibrada por un combinación de salida por evaporación ( $E$ ) y salida de líquido ( $Q$ ) (es decir,  $I = Q + E$ ).

Los flujos no permanecen constantes, ni el volumen almacenado en el lago. Los flujos no permanecen constantes y tampoco el volumen almacenado en el lago. Las proporciones de los flujos son dinámicos y más o menos constantes durante el tiempo, y los cambios volumétricos son menores. El lago podría considerarse cercano al estado estacionario hidrológico.

El tiempo de residencia indica qué tan rápido se reemplaza el agua en el sistema. La residencia el tiempo estimado usando isótopos estables para el lago Los Padres osciló entre 0,5 y 2,5 años con un valor medio de  $1,11 \pm 0,65$  años.

El estudio del Instituto de geología de costas y del cuaternario permitió poner en evidencia que existe un balance hidrológico en el que con un adecuado manejo de la compuerta en determinados períodos de tiempo es posible mantener el volumen de la laguna e incluso manejar el nivel de la laguna debido a que las entradas y salidas son anualmente compensadas. Sería posible en este caso elevar el promedio de nivel de laguna para obtener un mayor potencial de generación pero eso conllevaría a un rediseño de la obra civil emplazada actualmente.

El presente trabajo si bien se va a basar en la compuerta actual y el nivel promedio actual con una excavación de 1 metro del lado seco para obtener una mayor caída útil ya que tendría menor impacto ambiental que elevar el nivel de la laguna. Podría discutirse a futuro el rediseño aplicando técnicas en la obra civil para mejorar la limpieza y filtrado del agua afluente mencionadas en el capítulo anterior (rejillas tanto del lado del lago como de desagüe, desarenador, una correcta cementación de ambos lados, etc.) y la posibilidad de elevación del nivel promedio de la laguna [17].

## 2.8. Análisis de la presa actual

Se realizó un relevamiento de la presa para poder realizar un análisis hidrológico aproximado acerca de como va a ser la descarga de acuerdo a los niveles que se manejan anualmente. El grupo de IGCyC realizó a partir de 2010 mediciones de nivel en distintos puntos de la laguna. Como se puede ver en las figuras 2.14 y 2.13 se presenta el croquis de la compuerta actual existente.

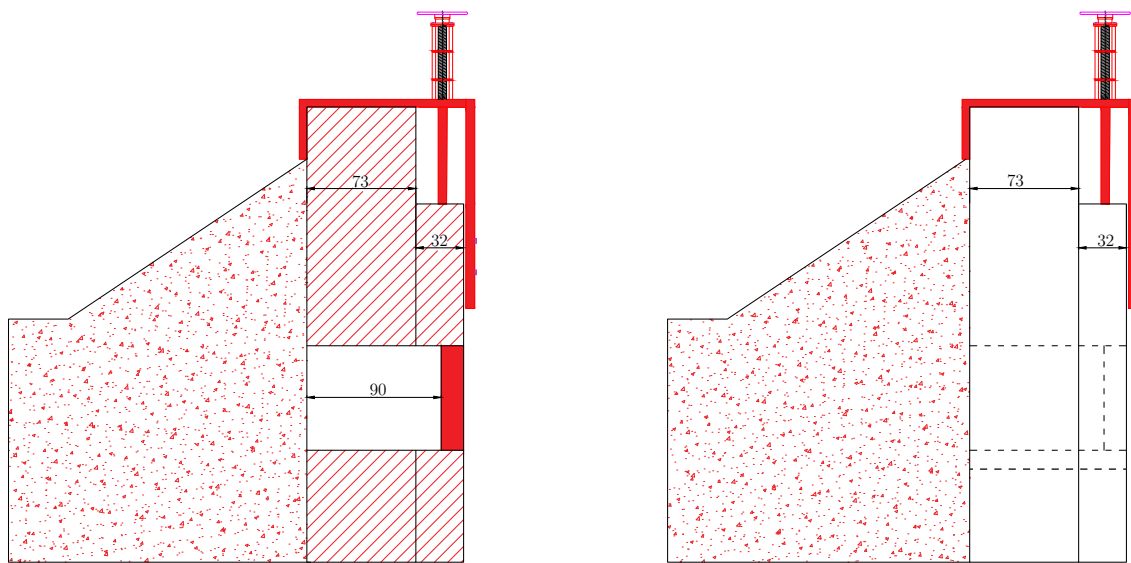


Figura 2.13: Vista lateral y corte de compuerta actual. Medidas en [mm]. Fuente: Elaboración propia.

Midiendo en varios puntos cercanos al lugar de medición hecho por IGCyC y comparando con la altura en la compuerta se pudo establecer el nivel "0" de la laguna y coincide aproximadamente con la arista inferior de la compuerta. En principio, la compuerta trabajó en contracción suprimida en esta arista pero debido a que no hay una cementación del lado mojado se creó una depresión en la zona cercana y de la rama de desagüe.

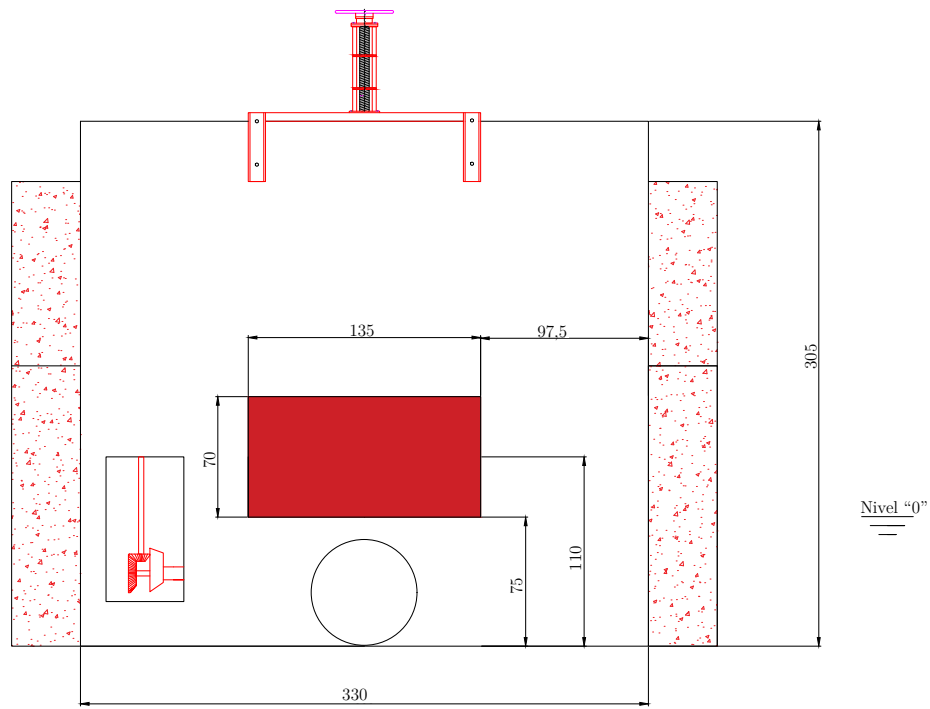


Figura 2.14: Vista frontal "seca" de presa actual. Medidas en [mm]. Fuente: Elaboración propia.

La compuerta se comporta como un orificio delgado debido a que el espesor  $< 3$  "a" y con contracción incompleta debido a que la compuerta está a una distancia menor a 3 "a" nuevamente de cualquier pared.

La presa actual tiene una cementación muy débil de ambos lados y el principal problema se presenta a la entrada del canal de desagüe donde se acumulan una gran cantidad de desechos. Esto se debe a que no existe método alguno de recolección o de filtración de los mismos.

### 2.8.1. Caudales del tornillo de Arquímedes

Considerando una altura aproximada de 2 metros netos aprovechables, si entramos con este dato en la figura 1.14 y con caudales entre  $0.5 \frac{m^3}{s}$  a  $4 \frac{m^3}{s}$  aproximadamente nos indica que valores de generación podríamos aprovechar. Según este gráfico podríamos obtener desde 10 [kW] hasta unos 50 [kW] aproximadamente.

El poder proporcionado por el TA viene dado por la ecuación 1.1 donde  $\nu$  será el rendimiento de una turbina de Arquímedes. La eficiencia de los TA está directamente relacionada con la eficiencia del generador y con los diferentes pérdidas presentes en la planta. Estas principales pérdidas de carga, que resultan en pérdidas de potencia, se deben a la fugas y fuerzas de fricción inducidas por el viscosidad del fluido. Por tanto, es importante minimizar estas pérdidas con el fin de obtener una eficiencia óptima.

Debido a que el generador va a estar conectado a red y no de forma aislada a una carga, se consultó al ente encargado del manejo de la compuerta (OSSE) sobre la disponibilidad de caudal. Se optó por seguir la recomendación del común manejo que se ha dado con una apertura del 25% con una disponibilidad anual del 90% donde se obtuvo un caudal de diseño de  $0.65 \frac{m^3}{s}$  aproximadamente para asegurar un funcionamiento relativamente elevado de la turbina y que haya disponibilidad de agua. Además, este valor fué consultado con la autoridad encargada del manejo y administración del caudal de descarga (OSSE) comparándolo con el cálculo de caudal económico realizado por la misma entidad arrojando valores similares.

Como Rorres [23], definimos el volumen de agua atrapada entre dos cuchillas sucesivas. Esta el volumen se denomina "cubo" y es igual a  $V_b$ . Definimos ahora las fugas presentes. La primera es la fuga debido a la brecha entre las palas y el canal  $Q_f$ . La segunda es la fuga dada por sobrellenado  $Q_o$ . Al desestimar estas dos fugas el caudal a través del TA es igual a la volumen de agua evacuado en una vuelta del tornillo multiplicado por su velocidad de rotación. Por lo tanto, definimos al caudal nomina  $Q_{nom}$  como:

$$Q_{nom} = m \cdot V_b \cdot \frac{n}{60} \quad (2.3)$$

Siendo "n" la velocidad de rotación en rpm. El total tasa Q debiendo en el tornillo es la suma de la nominal flujo más las dos fugas. Entonces tenemos:

$$Q = Q_{nom} + Q_f + Q_o \quad (2.4)$$

Si se despreciaran estas fugas y asumiendo que se encuentra en el punto de llenado óptimo podría despejarse la velocidad a la que girará la turbina.

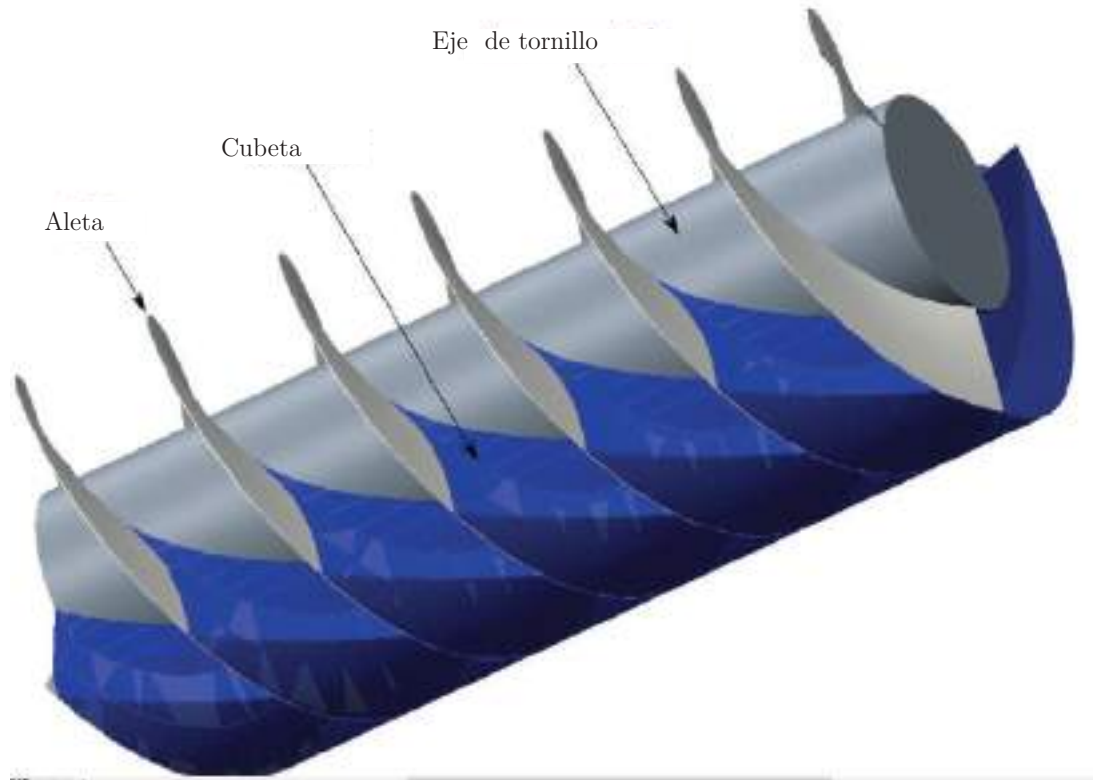


Figura 2.15: Esquema de tornillo en el punto de llenado óptimo con los distintos "baldes" de agua. Fuente: [31]

### Potencia generada

Según el teorema de Bernoulli, en estado estable y descuidando las transferencias de calor, luego conservamos energía a lo largo de una línea de corriente:

$$h_e = \frac{E}{m \cdot g} = \left( z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) = \text{constante} \quad (2.5)$$

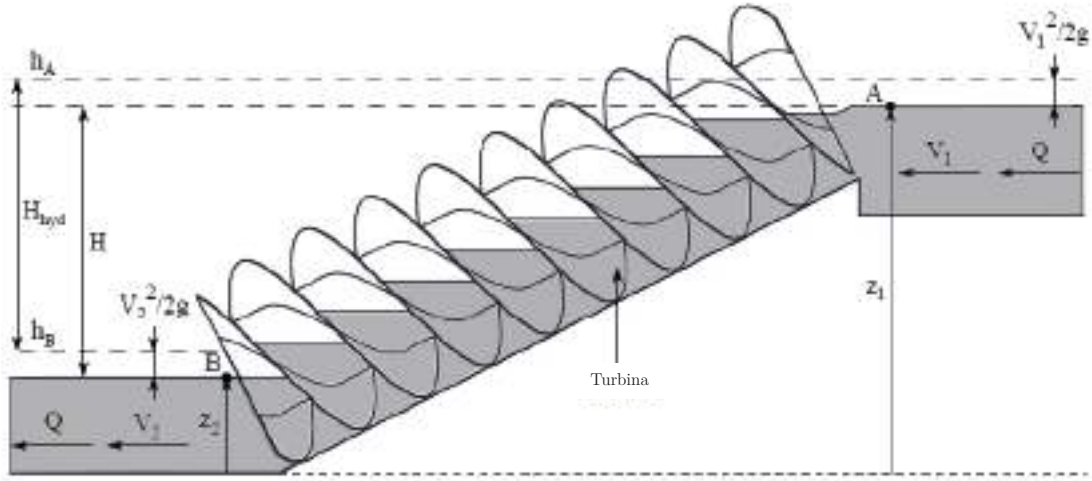


Figura 2.16: Características del caudal en una instalación hidráulica. Fuente: [24]

Siendo  $h_e$  la altura hidráulica. Para determinar la energía que la turbina puede recuperar, aplicamos el Teorema de Bernoulli entre los puntos de toma aguas arriba (A) y la descarga aguas abajo (B) según la figura 2.16. Entonces obtenemos:

$$E_{hyd} = m \cdot g \cdot (h_A - h_B) = m \cdot g \cdot \left( (Z_1 - Z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \right) \quad (2.6)$$

donde  $p_1 = p_2 = p_{atm}$ . La carga hidráulica que la turbina puede recuperar (ver figura 2.16) es igual a :

$$H_{hyd} = h_A - h_B \quad (2.7)$$

y la altura de caída, es:

$$H = Z_1 - Z_2 \quad (2.8)$$

En el caso de un tornillo de Arquímedes, generalmente se supone que la turbina no recupera ninguna energía cinética del fluido. Entonces, cuando las dimensiones del canal de entrada y salida son iguales, tenemos  $V_1 \simeq V_2$  y  $H_{hyd} \approx H$ . En el caso de que la

salida del tornillo sea directamente en el río y no en un canal de salida, es posible tener  $V_2 > V_1$  [33]. Lo que lleva a:

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} < 0 \quad (2.9)$$

La potencia hidráulica recuperable es, por tanto, ligeramente inferior. Las dimensiones del canal de salida, por tanto, tienen una ligera influencia en la energía recuperable. Desarrollando ([33]), la potencia hidráulica recuperable por un tornillo de Arquímedes es dada por:

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.10)$$

La potencia mecánica suministrada por el tornillo de Arquímedes se determina mediante:

$$P_{mec} = C_{ta} \cdot \omega \quad (2.11)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular del tornillo [ $rad^{-1}$ ] y  $C_{ta}$  el torque proporcionado por el tornillo [N.m].

La eficiencia de la turbina es entonces igual a:

$$\eta_{ta} = \frac{P_{mec}}{P_{hid}} = \frac{C_{ta} \cdot \omega}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \quad (2.12)$$

donde  $P_{hid}$  es la potencia aportada por el fluido.

Se han realizado pruebas experimentales con diferentes tamaños de tornillos y motores, determinando las fugas mencionadas con elevada precisión y motor DC para control de velocidad probando que el rendimiento es función únicamente de la geometría del tornillo y corregido por las fugas se adapta a los datos experimentales [29]. El torque aportado por el tornillo es:

$$C_{ta} = C_{motor} + C_{fricción} \quad (2.13)$$

donde  $C_{fricción}$  es el inducido por a fricción de los rodamientos. Este par fue determinado experimentalmente midiendo el par motor necesario para hacer girar el tornillo para diferentes velocidades de rotación. Parece que este par aumenta linealmente con la rotación velocidad como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{fricción} = 0,000171 \cdot n + 0,046065 \quad (2.14)$$

Como se utilizan rodamientos precargados, esperamos que la ecuación 2.14 no cambie significativamente con un tornillo lleno o parcialmente lleno.

La potencia del tornillo está determinada por:



$$P_{ta} = C_{ta} \cdot \omega_{ta} \quad (2.15)$$

Donde  $P_{ta}$  es la potencia del tornillo [W],  $C_{ta}$  es el torque del mismo [N.m] y  $\omega_{ta}$  la velocidad angular [ $rad^{-1}$ ] [31]. Por lo tanto, el rendimiento el tornillo es:

$$\eta_{ta} = \frac{P_{ta}}{\rho \cdot g \cdot H'Q} \quad (2.16)$$

Es necesario para tener en cuenta los rendimientos de todos sus componentes. Por tanto, es necesario tener en cuenta la eficiencia hidráulica de la turbina de tornillo, la mecánica del multiplicador M, la eficiencia del generador G y en n, el del inversor o variador de frecuencia O si es una unidad de control de velocidad variable. No se tiene en cuenta la eficiencia mecánica de los distintos acoplamientos. cuenta porque su rendimiento es generalmente muy cercano a 1.

El rendimiento total de la micro-central viene dado por la ecuación:

$$\eta_{mch} = \eta_{ta} \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_O \quad (2.17)$$

Según variada bibliografía el rendimiento del tornillo alcanza a partir de un 40% de llenado (ver figura: 2.17 a un 80% de eficiencia alcanzando máximos de hasta 90 o 95%. La eficiencia del tornillo es generalmente superior al 80% en buenas condiciones hidráulicas [30].

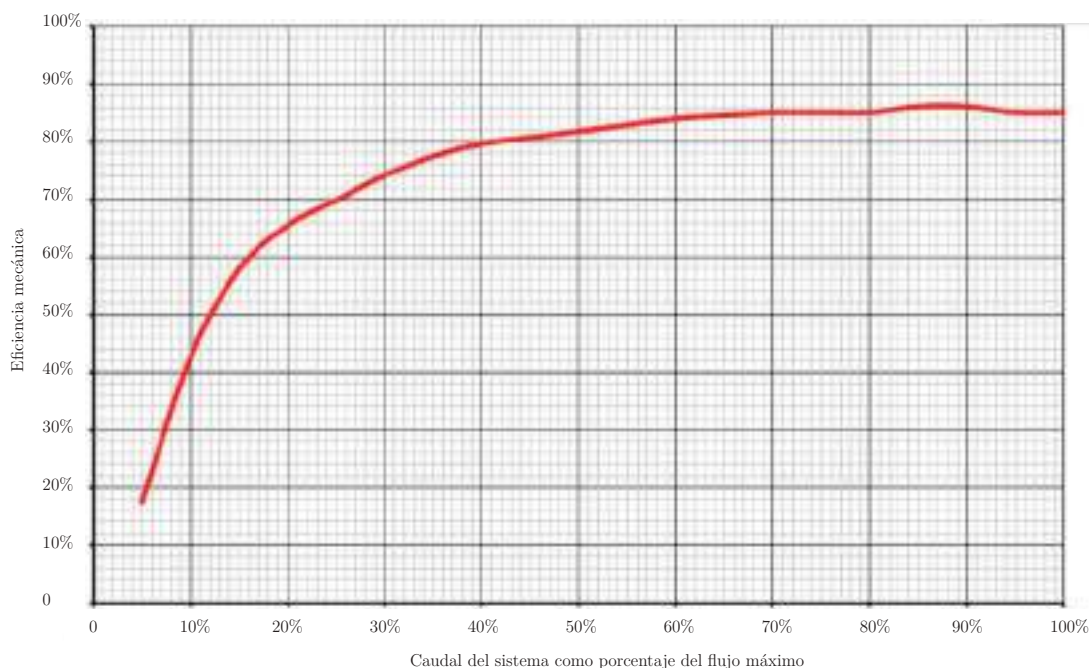


Figura 2.17: Curva de eficiencia típica de turbina hidráulica de tornillo de Arquímedes. Fuente: [27]

La eficiencia del generador más inversor si hay variación de velocidad, depende del tipo elegido. En general, los rendimientos obtenidos son superiores a 90% [24].

La potencia nominal del  $P_{mch}$  suministrada por la instalación hidroeléctrica es igual a :

$$P_{mch} = \eta_{mch} \cdot P_{hyd} \quad (2.18)$$

Considerando los datos del emplazamiento la potencia hidráulica disponible será de aproximadamente 15 [kW]. Lógicamente, estará afectada por el rendimiento propio de la máquina y la caja multiplicadora, un rendimiento eléctrico y demás que estará relacionado por condiciones geométricas, velocidad de trabajo, etc. Como la generación estará inyectando a red no se impone un piso de generación, como alimentar una carga determinada por ejemplo. Debido a que esto no es un requisito a cumplir, el generador inyectará de acuerdo al régimen de desagüe de la laguna buscando rendimiento aceptable del tornillo.

## **2.9. Conclusión**

Se realizó el estudio de la zona del proyecto, se obtuvo vasta información acerca de la hidrología de la laguna y en colaboración con el Departamento de Geología y Costas se pudo recabar datos de importancia.

Se visitó la zona para relizar mediciones en las cercanías del punto de desagüe y poder tomar medidas para confeccionar un croquis de la presa, proponer mejoras de la infraestructura, cambios para mejorar la generación, etc.



# Capítulo 3

## Diseño geométrico de turbina

### 3.1. Introducción

En este capítulo se propuso modificaciones en la obra que serán útiles para el estudio y diseño de la turbina de Arquímedes. Se analizaron los datos obtenidos en el capítulo anterior y complementados con una propuesta de nueva presa logran establecer los parámetros necesarios para diseñar geoméricamente la turbina y los elementos que la componen.

### 3.2. Compuerta propuesta

Será necesario realizar tareas y obra de reacondicionamiento de la obra actual. Esto incluye la instalación de rejillas para filtrar basura de tamaño grande que pueda interferir con el propósito de este proyecto y una cementación adecuada tanto del lado seco como de lado mojado. Para un mayor aprovechamiento del potencial eléctrico a generar se propone excavar 1 [m] del lado seco. Esto no modificaría el comportamiento de la laguna y sería una mejora para el futuro desagüe, requeriría trabajos de excavación de aproximadamente 30 metros del arroyo. En las figuras 3.1 y 3.2 puede observarse el croquis de la compuerta propuesta donde se logra una caída de 2,1 [m] lo cual incrementaría la capacidad de generación.

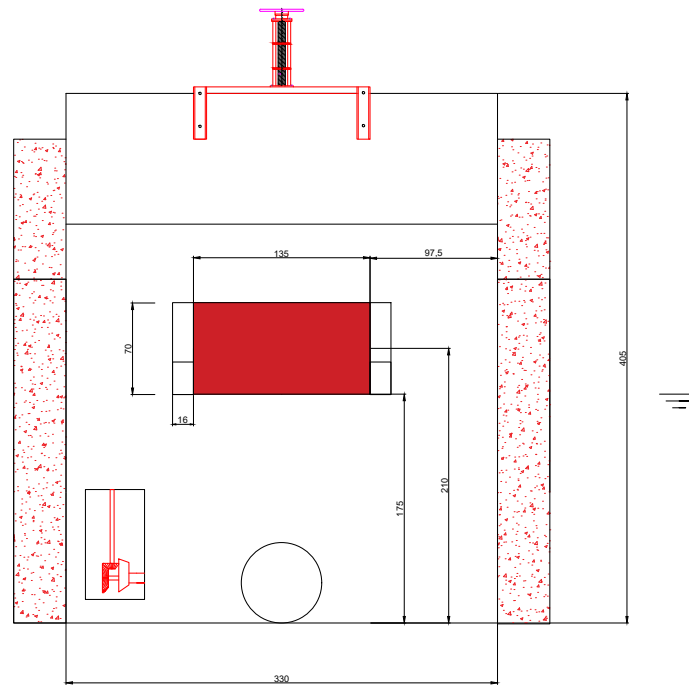


Figura 3.1: Vista frontal de presa propuesta. Medidas en [mm]. Fuente: Elaboración propia.

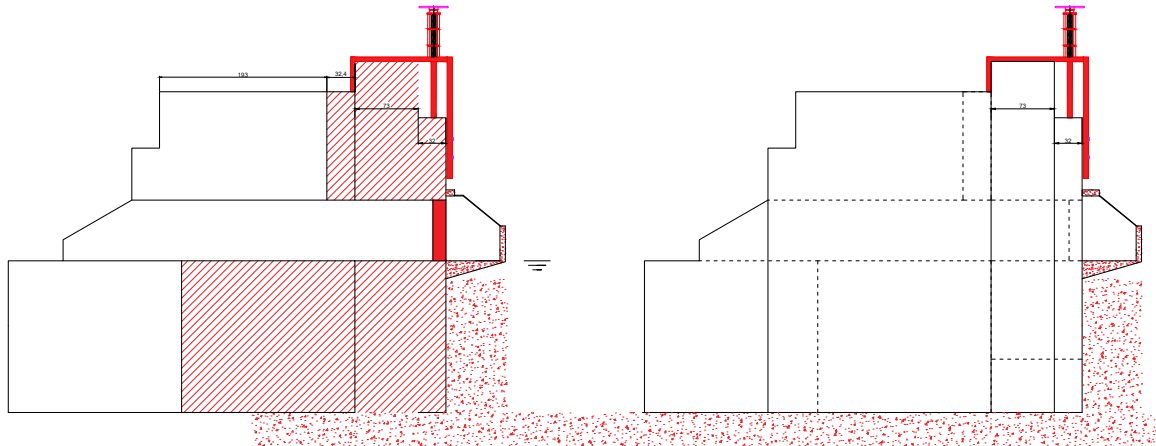


Figura 3.2: Vista lateral y corte de presa propuesta con agregado de rejillas y cimentación. Medidas en [mm]. Fuente: Elaboración propia.

Si se hubiera optado por elevar el nivel de la laguna también, se debería modificar toda la obra. La compuerta debería elevarse igualmente para lograr mayor caída, lo cual resultaría menos económico y con mayor impacto ambiental que solo la excavación.

Debido a la característica de la turbina de Arquímedes la altura de caída será la útil o neta ( $H'$ ), no se precisan tuberías ni cámaras de carga lo cual abaratan y simplifican la instalación.

Al realizar una excavación es importante aclarar que las condiciones para el estudio de la descarga en la compuerta no se modifican.

### 3.2.1. Caudal de diseño para la presa propuesta

Es necesario establecer un caudal de diseño para la generación. El procedimiento para su determinación se basará en una gran cantidad de mediciones realizadas entre los años 2010 y 2014 de manera que sea una muestra representativa de la dinámica hidrológica de la laguna.

De acuerdo a los niveles obtenidos en este rango de tiempo y aplicando las ecuaciones 1.7, 1.10 y 1.11 es posible determinar el caudal de desagüe en la compuerta. Luego,

el caudal de diseño surgirá obtener la curva de duración de caudales medios diarios. Esto consiste en la contabilización de la recurrencia de valores de caudales dentro de un determinado rango, con el fin de calcular las frecuencias relativas, las frecuencias absolutas y las relativas acumulativas de los mismos.

Se tomaron 735 mediciones de nivel medio diario desde el 25/2/2010 hasta el 14/04/2014. Las mediciones fueron captadas por un sensor colocado a 5 [cm] sobre el fondo en la ubicación mostrada en la figura 3.3.



Figura 3.3: Ubicación de sensor de medición de nivel de "Laguna de Los Padres". Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de la curva de duración de caudales, se considera un rango de caudales de  $0.05 \frac{m^3}{s}$  dependiendo de la apertura de la compuerta y se los ordena en orden descendente, luego con la utilización Microsoft Excel, se produce la contabilización de ocurrencia en dicho rango, obteniendo así la frecuencia absoluta. Se analizó para la compuerta en apertura al 25, 50, 75 y 100% aunque el común manejo de la compuerta es de apertura al 50%.

Se realizó una tabla, ordenando los datos de los caudales en los rangos en orden y obteniendo las frecuencias absolutas y relativas acumuladas la cual, representa la duración de caudales para las distintas aperturas.



Graficando se obtuvo la curva de duración de caudales (ver figuras 3.4 y 3.5), donde el eje de las ordenadas representa el caudal, y el eje de las abscisas la frecuencia relativa acumulativa o duración de caudales.

La información que nos brindan estas figuras es conocer la probabilidad, en porcentaje de tiempo del período estudiado (2010 - 2014) durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos con diferentes aperturas de la compuerta. La curva indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia.

La curva de duración de caudales es de suma importancia a la hora de elaborar proyectos hidráulicos. La desventaja de la curva de duración de caudales, es que no representa los caudales según su secuencia natural, por lo que no se conoce si los caudales ocurren en forma consecutiva o si son distribuidos a lo largo del periodo de tiempo en el cual se tomaron los registros. La probabilidad es el índice de garantía que variará de acuerdo al proyecto y permite obtener un caudal de diseño acorde.

Para estimar el caudal de diseño, debe conocerse la demanda a satisfacer por el sistema de generación, de forma que la oferta de potencia y energía a suministrar por la central se ajuste a la misma. Si el valor de caudal de diseño calculado en función de la demanda se ubica por debajo de los caudales mínimos (estación seca) del arroyo, se acepta como valor del proyecto.

En el caso de sistemas de generación por turbinas, a este valor suele descontarse el caudal ecológico. Este caudal es el reservado para que el lecho del río tenga siempre un curso de agua y no se derive todo el caudal al generador hidroeléctrico. Cabe aclarar que este concepto solo se aplica a la tecnología de turbinas, donde con el objeto de generar grandes diferencias de altura, la toma de caudal se encuentra alejada de la ubicación de la turbina. Si no se dejase un cierto caudal permanente en el río, el lecho comprendido entre la toma de agua y la central quedaría seco la mitad del año.

Para el caso del generador de tornillo sinfín, el caudal ecológico es nulo. Esto se debe, por un lado, a que la longitud de lecho de río afectado es despreciable, ya que la toma y descarga de agua están separadas por algunos metros. Por el otro, a que el sistema permite el paso de la vida acuática por el sistema [26]. Al no haber cañería de presión, no existen pérdidas por rozamiento del fluido. Al ser un grupo generador aislado que puede generar en determinado momento no se necesitaría en primera instancia garantía de trabajar al 100%.

Si se hace un promedio histórico de los caudales por % de apertura se obtienen los datos de la tabla 3.1:

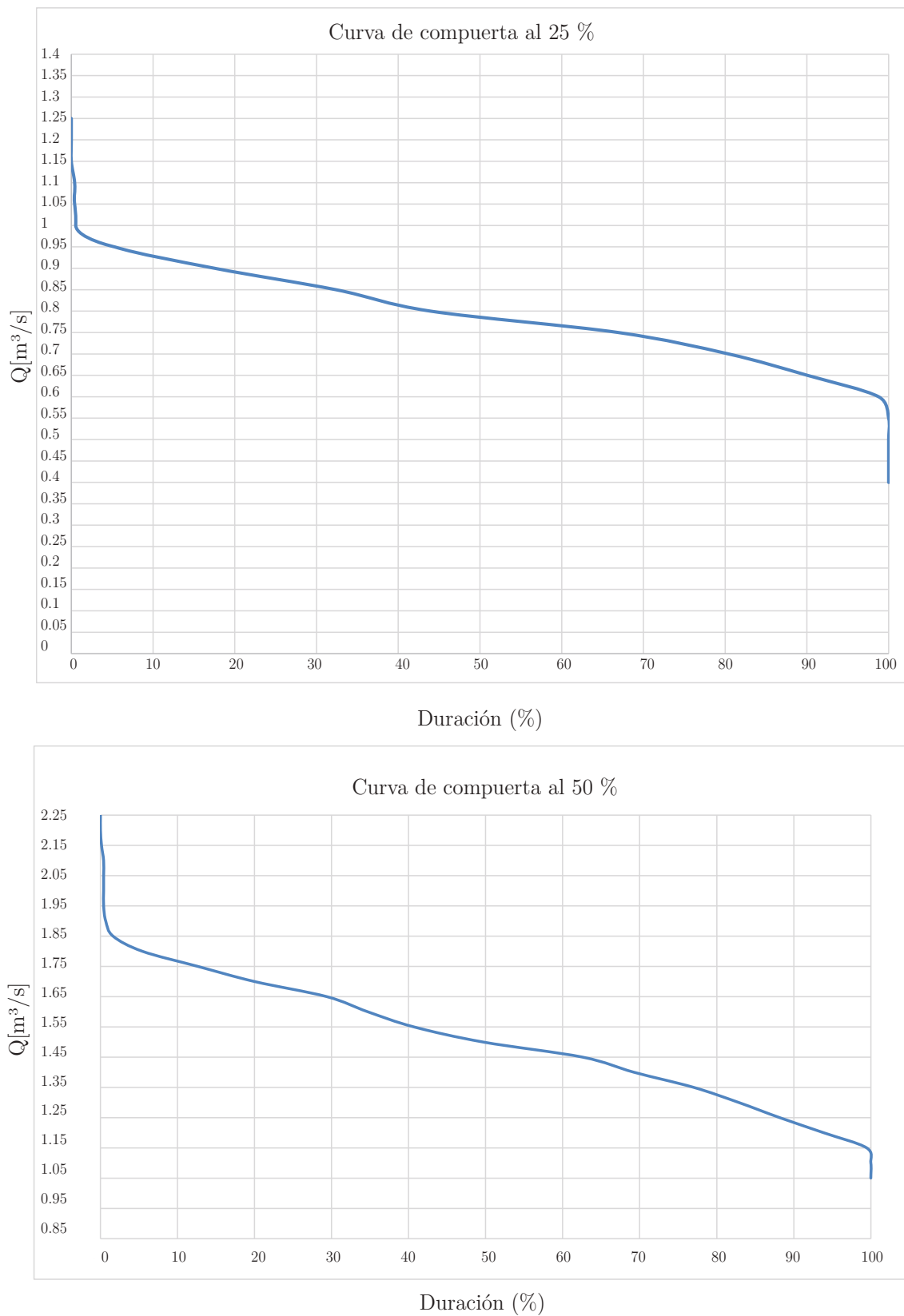


Figura 3.4: Curva de duración de Caudales con compuerta abierta al 25 y 50%. Fuente: Elaboración propia.

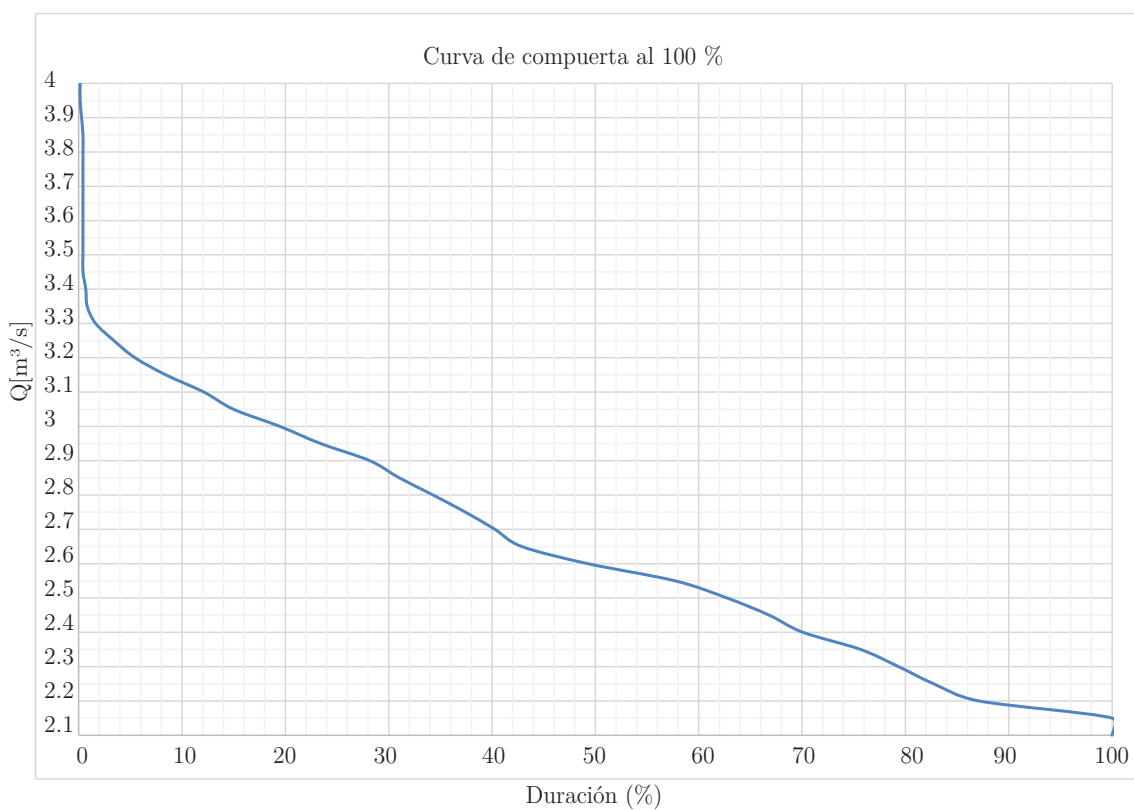
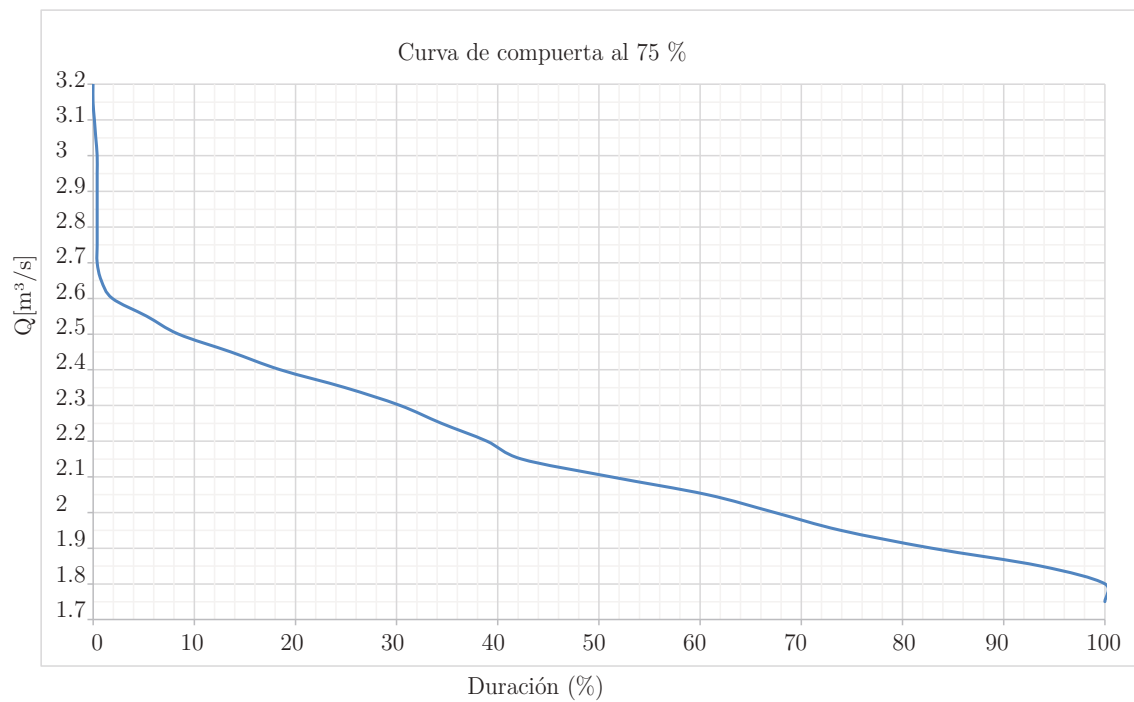


Figura 3.5: Curva de duración de Caudales con compuerta abierta al 75 y 100%. Fuente: Elaboración propia.

% de apertura de compuerta	Caudal medio histórico [ $\frac{m^3}{s}$ ]
25	0,744
50	1,409
70	2,101
100	2,592

Tabla 3.1: Promedios históricos de caudales

### 3.3. Parámetros de diseño

La eficiencia que el dispositivo puede lograr está limitada por la geometría externa y la mecánica. Hay dos conjuntos de aspectos de diseño que afectan la geometría general del dispositivo, los parámetros internos y externos. Los internos pueden ir cambiando en la etapa de diseño y las externas estarán dadas por el propio emplazamiento y el lugar lo cual hace que sean datos difíciles de cambiar. En la tabla 3.2

Símbolo	Parámetro	Externo/Interno
D	Diámetro externo [m]	E
d	Diámetro interno [m]	I
$L_b$	Longitud de tornillo [m]	E
$\beta$	Ángulo de inclinación [°]	E
m	Número de aletas	I
n	Velocidad de rotación	
$\omega$	Tasa de rotación	

Tabla 3.2: Parámetros externos e internos de diseño

El método detrás de la optimización de cualquier turbina a menudo combina varios parámetros clave que son vinculados entre sí, es decir, cuando uno cambia, afecta al otro, así como al rendimiento del dispositivo. Estos enlaces también se conocen como relaciones de diseño y son importante de entender para optimizar la geometría de forma eficaz. Se definen los siguientes parámetros dimensionales en la tabla 3.3

Símbolo	Parámetro
$\Lambda$	Paso o período de un filete [ $0 < \Lambda < \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\tan \beta}$ ]
$\nu$	Relación de volumen (fracción de volumen ocupado en 1 ciclo [ $\frac{V_t}{\pi \cdot R^2 \cdot \Lambda}$ ])
$\lambda$	Relación de avance [ $\frac{\Lambda \cdot \tan \beta}{2 \cdot \pi \cdot R}$ ]
$\delta$	Relación de radios [ $\frac{R}{r}$ ]

Tabla 3.3: Parámetros adimensionales geométricos de diseño



en comparación y las pérdidas por rebosamiento son evitadas con un correcto diseño de la turbina. Como se ha dicho antes, el caudal de diseño estará dividido en:

$$Q = Q_{nom} + Q_p \quad (3.2)$$

La relación entre estos dos caudales se encuentra entre 0.02 y 0.06 dependiendo únicamente del tamaño de la turbina. Si bien esta turbina es relativamente chica a comparación de otras instalaciones que manejan caudales mucho más elevados se adopta el peor caso que es tener una relación de 0.06.

### 3.4. Inclinação del tornillo y número de filetes

Como se ha presentado antes, la caída prevista será de poco menos de 2 metros. Será necesario precisar el ángulo de caída que determinará el largo del tornillo finalmente. Nagel [26] propone que la inclinación  $\beta$  entre  $22^\circ$  y  $36^\circ$  aunque de acuerdo a al caso particular estos límites pueden variar [25]. Un tornillo de Arquímedes a escala de laboratorio fue fabricado por Greenbug Energy (Delhi, ON, Canadá) para permitir pruebas controladas de un tornillo, donde funcionaba continuamente con posibilidad de variar el ángulo. Se recaudaron datos acerca de caudal, torque y velocidad de acuerdo al volumen de llenado y ángulo.

A continuación en la figura 3.7 se muestran algunos resultados para distintos tipos de llenado con fuga y sin fuga de espacio. Los modelos predicen que con fugas presentes para todos los niveles de llenado, la disminución de la pendiente aumentará la eficiencia del tornillo, lo que concuerda con las predicciones de Müller y Senior [29].

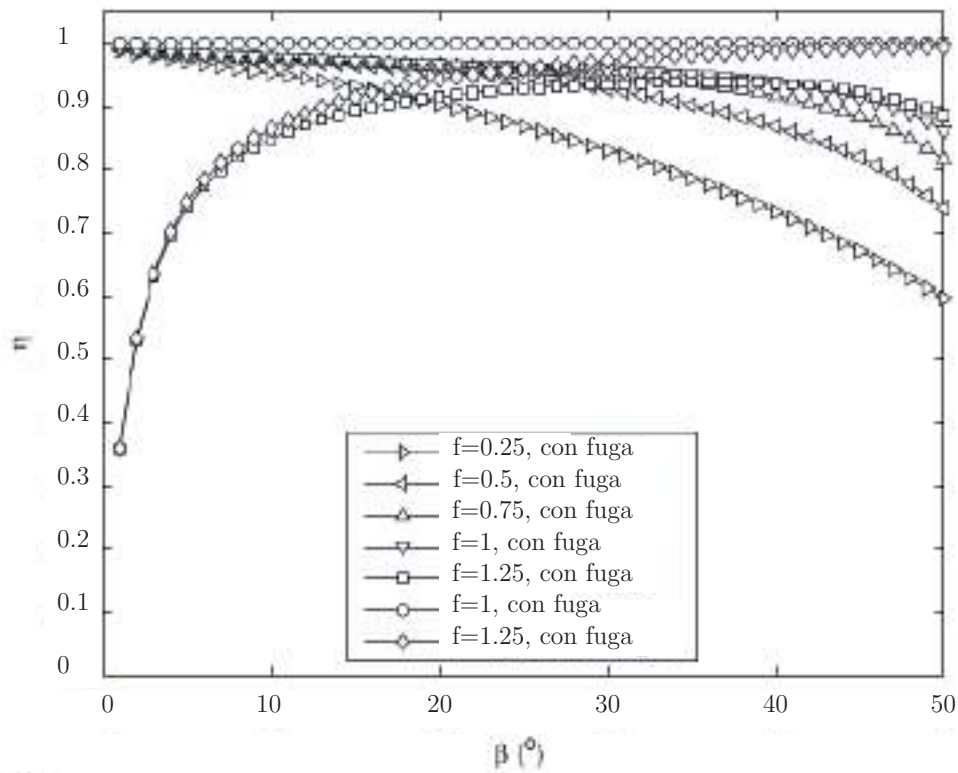


Figura 3.7: Estudio de tornillo. Relación  $\eta$  vs.  $\beta$ . Fuente: [28]

Pero la reducción de la pendiente provocará un aumento en la longitud del tornillo, aumentando el potencial de pérdidas por fricción de fluidos y cojinetes en un tornillo real (y también aumentando el costo del tornillo) [28].

Según el estudio de Muller [29], la eficiencia depende del ángulo y número de vueltas e indican que la eficiencia aumenta con ángulo decreciente y número creciente de vueltas.

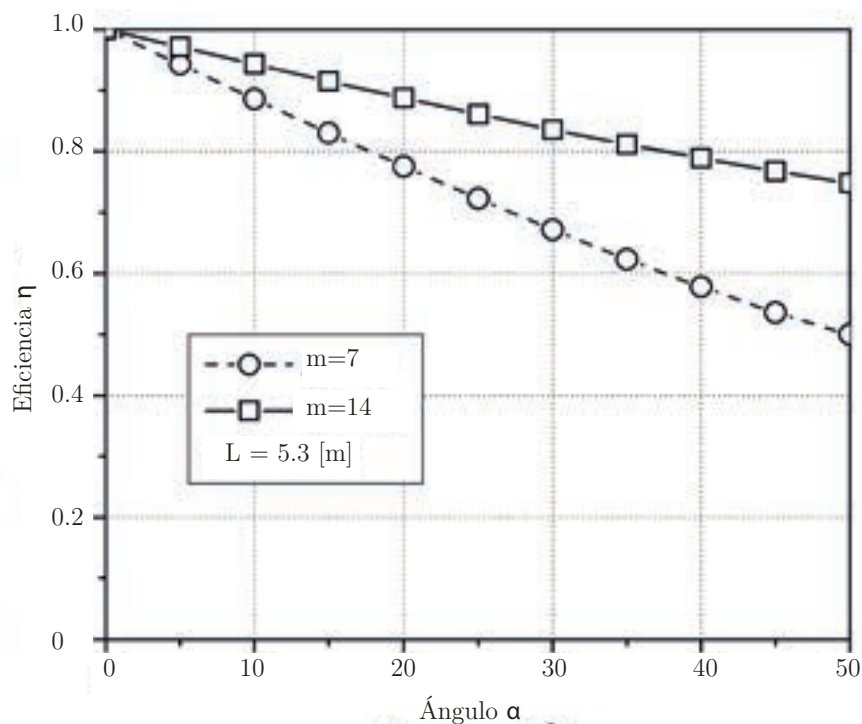


Figura 3.8: Eficiencia teórica en función del ángulo y número de vueltas. Fuente: [?]

Implica que, en particular para ángulos más pronunciados, un número mayor de vueltas es deseable. Además la teoría sugiere que para mantener altas eficiencias, el nivel del agua corriente arriba debe mantenerse constante y alto en comparación con el radio. Trabajando con los límites de los ángulos posibles, se podría trabajar con tornillos de  $30^\circ$  hasta  $22^\circ$ . Se simuló en el programa de MatLab para distintos ángulos obteniendo los resultados de diámetros, largo y potencia desarrollada para una comparación. A continuación se detalla en una tabla los valores obtenidos:

Ángulo	Diámetro exterior [m]	Largo [m]	Potencia generada teórica [kW]
$22^\circ$	1.42	3.53	6.343
$26^\circ$	1.47	3.03	5.984
$30^\circ$	1.53	2.68	5.479

Tabla 3.4: Comparación de tornillos a distintos ángulos

Al ver la tabla comparativa 3.4, se elige un ángulo de diseño de  $30^\circ$  ya que se logra disminuir el largo del tornillo sin que aumente demasiado el diámetro y con una eficiencia que no varía demasiado entre los caso y se abaratará el coste de la instalación ya que se acorta el eje, el cual deberá ser robusto para soportar las solicitaciones dinámicas del



agua. No se recomienda pasar el límite de los  $30^\circ$  debido a la pérdida de eficiencia que se produce a partir de este punto. Además, este valor se encuentra dentro de los valores típicos usados por los fabricantes ( $20^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $26^\circ$  y  $30^\circ$ ).

El número de hilos de un Tornillo de Arquímedes puede variar teóricamente hasta el infinito y con esto se obtendría una eficiencia ( $\eta$ ) de 99%. El valor del número de hilos también se encuentra directamente relacionado con la capacidad de fluido que se transporta por vuelta, para un tornillo de igual diámetro. Sin embargo, por motivos constructivos se usa un número de hilos de 1, 2, 3 y 4, siendo más compleja la fabricación a mayor valor de número de hilos [23].

De esta manera, se opta por un Tornillo de Arquímedes de  $m = 3$  hilos con el que se obtiene una adecuada eficiencia y que no sea complicada su fabricación.

### 3.5. Paso, diámetro y velocidad de tornillo

Según Muysken en 1932, a través de datos experimentales llegó a una expresión aproximada de la velocidad del tornillo funcionando como bombas (ver ecuación 3.3).

$$n \leq \frac{50}{D^{\frac{2}{3}}} \quad (3.3)$$

La velocidad óptima determinada por Brada [1999] es ligeramente superior e igual a:

$$n \leq \frac{56}{D^{\frac{2}{3}}} \quad (3.4)$$

Esta diferencia se explica por el modo de funcionamiento diferente del tornillo. Se demostró que valores superiores de velocidad rotacional producen excesivas pérdidas por fricción y fuerzas centrífugas. Por lo tanto, este valor es el recomendado tanto por Nuernberk y Rorres como por Lashofer y muchos constructores europeos de tornillos de Arquímedes [33].

El cálculo del diámetro es un proceso iterativo en el que debe ser elegido un "D inicial". Se asumirá en principio un valor de 0.4 [m]. Se realiza el siguiente procedimiento:

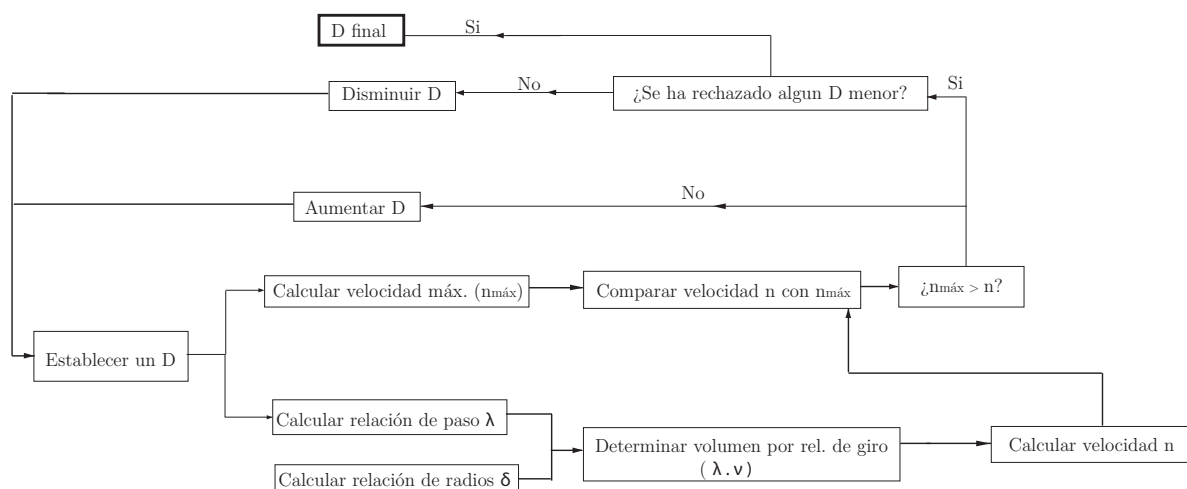


Figura 3.9: Procedimiento para la obtención del diámetro externo del tornillo

Según Rorres [23] el parámetro óptimo ( $\lambda$ ) para  $N = 3$  es de 0.2217 (ver figura 3.6) y la relación de  $\frac{\lambda}{D}$  es un parámetro común para las bombas de tornillo donde Nagel y Radlik recomendó un valor predeterminado de 1,00 [26]. Esta recomendación se mantiene en  $\frac{2}{3}$  de las instalaciones de tornillos de Arquímedes con una desviación sobre el valor medio del 3% [30]. En varias experiencias con tornillos funcionando como generadores se han trabajado con relaciones de paso  $P_p$  de 0.8 a 1.3 sin perder eficiencia de manera significativa. Sin embargo optará por una relación de paso de 1.

Teniendo la relación de diámetros elegida ( $\delta$ ) y la relación de avance es posible determinar la  $\lambda \cdot \nu$  es decir, la relación entre la relación de avance, la relación de diámetros y el volumen por relación de giro con la figura 3.10.

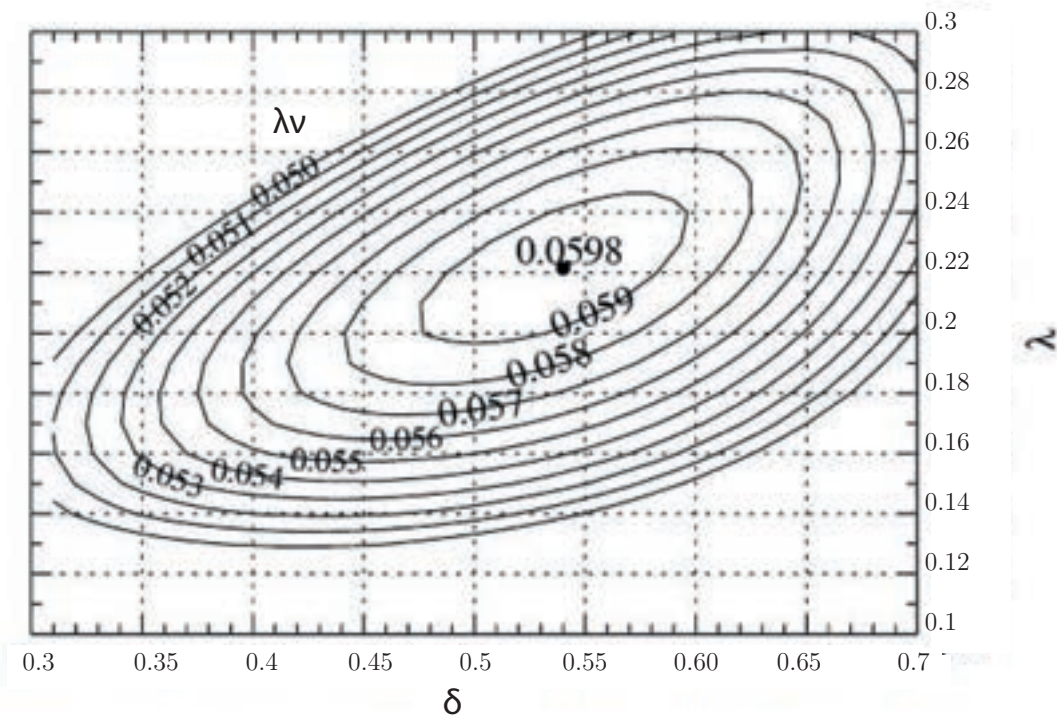


Figura 3.10: Relación  $\lambda \cdot \nu$  para un tornillo de  $m = 3$  filetes y en el punto de llenado óptimo. Fuente: [24]

Una vez obtenidos todos los parámetros útiles para este diseño , la velocidad de rotación de la turbina que se comparará con la máxima se obtiene a partir de la ecuación 2.3 y de los parámetros  $\lambda$  y  $\nu$  se obtiene la ecuacion 3.5:

$$n = \frac{Q_u \cdot 60 \cdot \tan \beta}{2 \cdot \pi^2 \cdot R^3} \tag{3.5}$$

$Q_u$  es el caudal útil que para este cálculo y  $Q = Q_u + Q_p$  y  $Q_p$  es el caudal de pérdidas originadas por el flujo de agua que pasa entre las palas y estructura. Según varios autores la relación entre estos caudales suele estar entre 0.02 y 0.06, siendo mas chico cuanto más grande es la turbina [23], si se toma una relación de 0.06 el caudal útil de aproximadamente  $0.61 \frac{m^3}{s}$ .

Debe tenerse en cuenta que debido al diámetro, deberá acortarse el largo del tornillo para que no choque con la superficie inferior, Esta altura del radio del tornillo no aporta a la altura útil de aprovechamiento hidráulico. Luego de realizar el cálculo iterativo se obtiene los siguientes datos del diseño:

Salto neto (H)	D [m]	$n_{max}[rpm]$	$\delta$	$\Lambda$	d	$\lambda$	$\lambda \cdot \nu$	Largo ( $L_b$ [m])
1.16	1.53	43,32	0.5	1.53	0.765	0,1838	0,0574	3.3

Tabla 3.5: Datos del diseño geométrico de tornillo

Luego, la distancia entre palas será:

$$S_x = \frac{\Lambda}{m} \quad (3.6)$$

por lo que la cantidad de aletas en el tornillo será, siendo  $L_b$  la longitud corregida del tornillo:

$$K = \frac{L_b}{S_x} \quad (3.7)$$

### 3.6. Ángulo de inclinación de aleta

Como condicion inicial, el tornillo será cubierto por agua como máximo hasta la mitad de su diámetro exterior y que la fuerza tangencial al tornillo es ejercida en el centroide del agua presente.

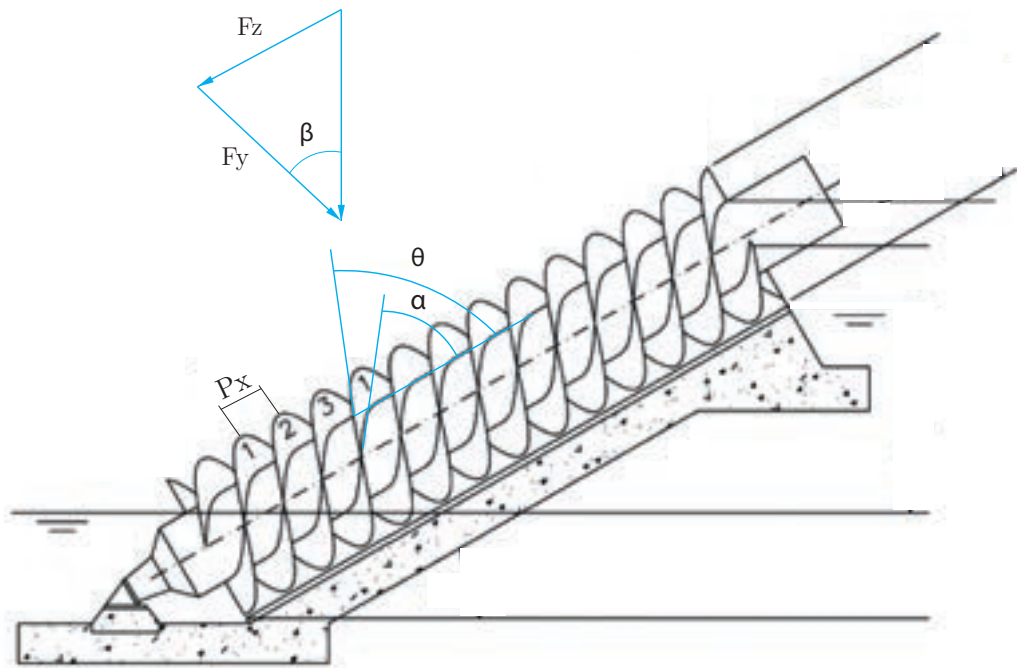


Figura 3.11: Plano "z - y" del tornillo. Fuente: [29]

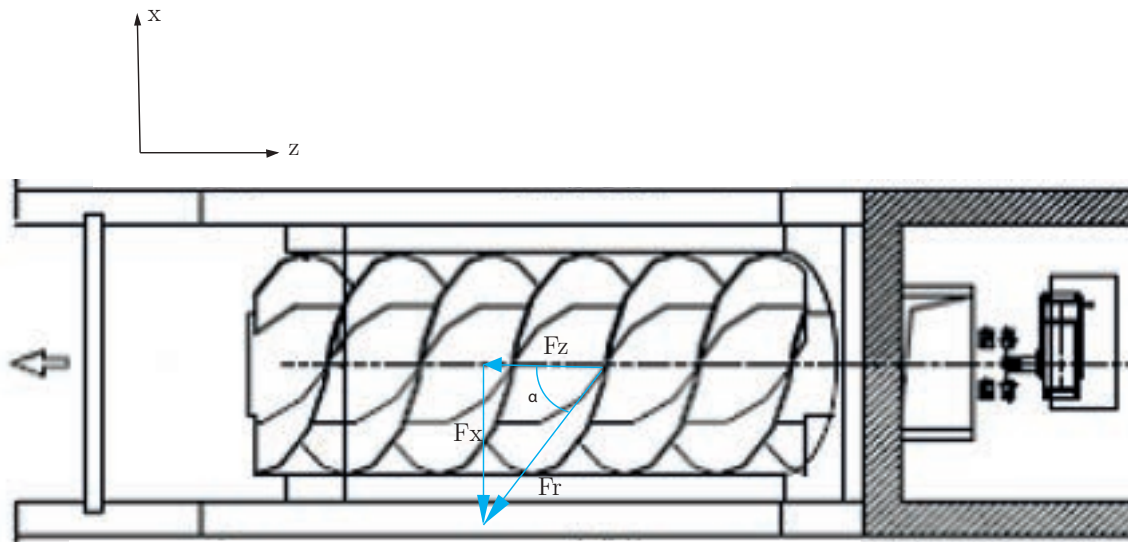


Figura 3.12: Plano "z - y" del tornillo. Fuente: [29]

Donde:

$F_x$  = Fuerza de empuje del agua en dirección del plano X o tangencial al tornillo.

$F_y$  = Fuerza de empuje del agua en dirección del plano Y o radial al tornillo.

$F_z$  = Fuerza de empuje del agua en dirección del plano Z o axial al tornillo.

$F_r$  = Fuerza de empuje del agua tangencial a la hélice.

$W$  = Fuerza del agua en dirección vertical (peso).

$A'$  = Área de contacto del agua.

$\omega$  = velocidad angular.

Los ángulos de la hélice interior ( $\beta$ ) y el ángulo exterior ( $\alpha$ ) se pueden relacionar mediante ecuaciones, debido a que se conoce con anterioridad que el tornillo está compuesto por hélices cilíndricas y estas pueden proyectarse en un desarrollo como se muestra en la figura 3.13.

En la figura 3.13 se esquematiza el desarrollo de la hélice en 1 período

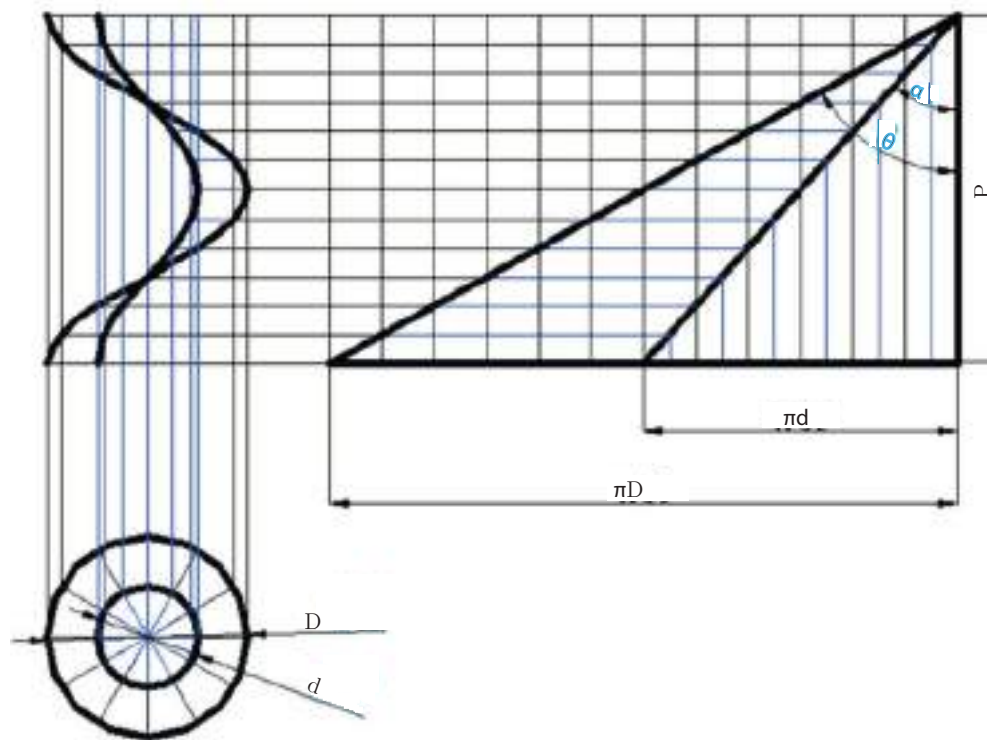


Figura 3.13: Desarrollo de hélice en 1 período

Como el avance del tornillo será  $\lambda = S_x \cdot m$ , siendo  $m$  la cantidad de aletas:

$$\tan(\theta) = \frac{\pi \cdot D}{m \cdot S_x} \Rightarrow \frac{\pi \cdot D}{\tan(\theta)} = m \cdot S_x \quad (3.8)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\pi \cdot d}{m \cdot S_x} \Rightarrow \frac{\pi \cdot d}{\tan(\alpha)} = m \cdot S_x \quad (3.9)$$

Entonces:

$$\Lambda = N \cdot S_x = \frac{\pi \cdot D}{\tan(\theta)} = \frac{\pi \cdot d}{\tan(\alpha)} \quad (3.10)$$

La longitud de la hélice del tornillo será aproximadamente:

$$L_b = \frac{H}{\sin(\beta)} \quad (3.11)$$

Para fines de análisis del tornillo es cubierto por el agua hasta la mitad de su diámetro exterior. Se asume que en  $y_c$  es un máximo, donde se da el máximo torque. Según Rorres [23] esta relación de radios es óptima alrededor de este valor para casi todos los números de aletas como se muestra en la tabla 3.6:

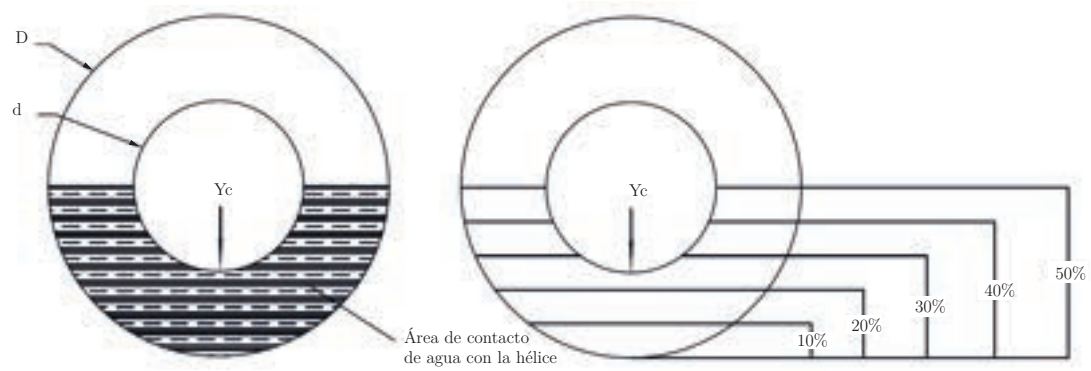


Figura 3.14: Vista frontal del tornillo. Superficie de contacto del agua. Fuente: Elaboración propia.



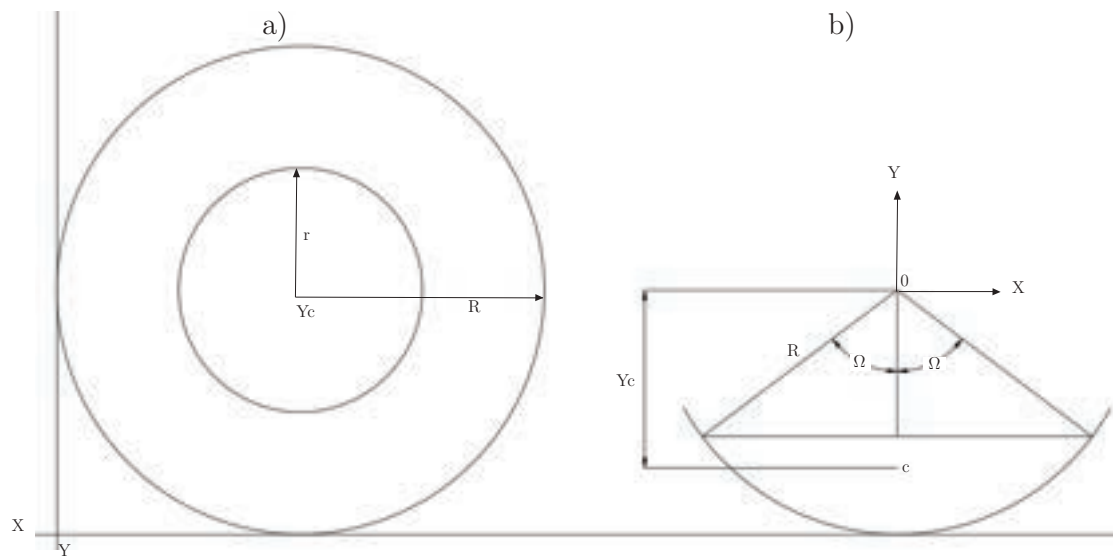


Figura 3.15: Propiedades de superficies planas. Fuente: Elaboración propia.

	Figura a	Figura b
$A =$	$\pi \cdot (R^2 - r^2)$	$R^2 \cdot [\Omega - \sin(\Omega) \cdot \cos(\Omega)]$
$Y_c$	$R$	$\frac{2 \cdot R}{3} \cdot \left[ \frac{\sin^3(\Omega)}{\Omega - \sin(\Omega) \cdot \cos(\Omega)} \right]$
$X_c$	$R$	$0$

Tabla 3.6: Propiedades de superficies planas

Utilizando las propiedades de superficies planas (figura 3.15) se deduce el centroide de cada área de contacto con respecto a un % de llenado. Si se asume que el área frontal del tornillo es:

$$r = \frac{R}{2} \tag{3.12}$$

$$A = \pi \cdot (R^2 - r^2) = \pi \cdot \left( R^2 - \frac{R^2}{4} \right) \tag{3.13}$$

$$A = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R^2 \tag{3.14}$$

Calculando la ubicación del centroide:

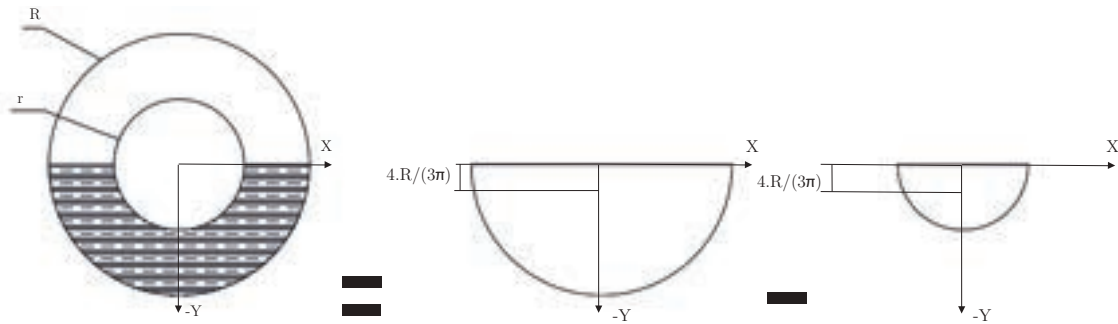


Figura 3.16: Cálculo de área de centroide Fuente: Elaboración propia.

Componente	Área [ $m^2$ ]	$X_c$	$Y_c$	$Y_c \cdot \text{Área}$
Semicírculo (R)	$\frac{\pi \cdot R^2}{2}$	0	$\frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}$	$\frac{2 \cdot R^3}{3}$
Semicírculo (r)	$-\frac{\pi \cdot r^2}{2}$	0	$\frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}$	$-\frac{2 \cdot r^3}{3}$
	$\sum \text{Área} = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2}$			$\sum \text{Área} \cdot Y_c = \frac{2 \cdot (R^3 - r^3)}{3}$

Tabla 3.7: Cálculo de centroide

De la tabla 3.7:

$$\sum \text{Área} \cdot Y_c = \frac{2 \cdot (R^3 - r^3)}{3} = 0,5833 \cdot R^3 \quad (3.15)$$

$$\sum \cdot \text{Área} = \sum \left( \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} \right) = 1,1781 \cdot R^2 \quad (3.16)$$

Despejando:

$$\frac{\sum \text{Área} \cdot Y_c}{\sum \text{Área}} = \frac{0,5833 \cdot R^3}{1,1781 \cdot R^2} = 0,4951 \cdot R \quad (3.17)$$




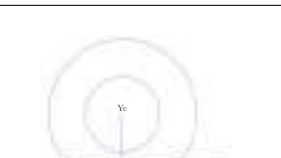
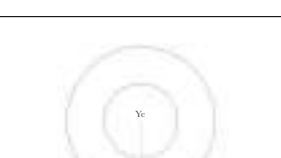
Área de contacto	Área [ $m^2$ ]	% de llenado	$Y_c$
	$\frac{3}{8} \cdot \pi \cdot R^2$	10%	$0,4951 \cdot R$
	$\frac{3}{10} \cdot \pi \cdot R^2$	10%	$0,6037 \cdot R$
	$\frac{9}{40} \cdot \pi \cdot R^2$	30%	$0,6907 \cdot R$
	$\frac{3}{20} \cdot \pi \cdot R^2$	20%	$0,7544 \cdot R$
	$\frac{3}{40} \cdot \pi \cdot R^2$	10%	$0,8471 \cdot R$

Tabla 3.8: Resumen de centroides para distintos % de llenado

De las figuras 3.11 y 3.12 tenemos las fuerzas actuantes en el tornillo. Para una simplificación del ángulo de hélice se tomará el sistema en estado hidroestático y un volumen simplificado pero para este análisis es suficiente. El peso del agua será:

$$W = \gamma \cdot volumen = \gamma \cdot A \cdot S_x \tag{3.18}$$

Luego las relaciones trigonométricas obtenidas del plano z - y:

1.

$$\tan \beta = \frac{F_z}{F_y} \tag{3.19}$$

2.

$$\cos \beta = \frac{F_y}{W} \tag{3.20}$$

3.

$$\sin \beta = \frac{F_z}{W} \quad (3.21)$$

Despejando la relación trigonométrica:

$$W = \frac{F_x}{\sin \beta} = \rho \cdot g \cdot S_x \cdot A \quad (3.22)$$

Despejando la fuerza de empuje:

$$F_z = \rho \cdot g \cdot P_x \cdot A \cdot \sin \beta \quad (3.23)$$

En el plano z - x:

$$\tan \alpha = \frac{F_x}{F_z} \quad (3.24)$$

Luego, la fuerza del agua en dirección tangencial al tornillo utilizando la relación trigonométrica obtenida en el plano z - x:

$$F_x = F_z \cdot \tan \alpha \quad (3.25)$$

$$F_x = \rho \cdot g \cdot P_x \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha \quad (3.26)$$

Para el cálculo del torque se asume que la fuerza se aplica en la superficie de contacto del agua. El torque resulta:

$$T = F_x \cdot Y_c = \rho \cdot g \cdot S_x \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha \cdot Y_c \quad (3.27)$$

Pero esta fórmula es para una sección del tornillo, la fórmula de torque para todo el tornillo:

$$T = F_x \cdot Y_c = \rho \cdot g \cdot S_x \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha \cdot Y_c \cdot K \quad (3.28)$$

$$\Lambda = S_x \cdot m \quad (3.29)$$

$$K = \frac{L_b}{S_x} \quad (3.30)$$

Siendo k el número de pasos en la longitud del tornillo. Por lo que:

$$T = F_x \cdot Y_c = \rho \cdot g \cdot L_b \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha \cdot Y_c \quad (3.31)$$

En la hélice el agua golpea con una velocidad ( $V_{ent}$ ), aproximadamente igual a  $\frac{Q}{A}$ , por lo cual el tornillo se mueve con una velocidad de rotación ("u"), esto es debido al ángulo de inclinación de la hélice ( $\alpha$ ) y con una velocidad de salida ( $V_{sal}$ ). Teóricamente la velocidad de entrada como la velocidad de salida son iguales ya que se trata de una turbina gravitatoria, esto se puede observar de mejor manera en la figura 3.17. Así obtenemos que la velocidad de rotación es igual a:

$$u = \omega \cdot Y_c \quad (3.32)$$

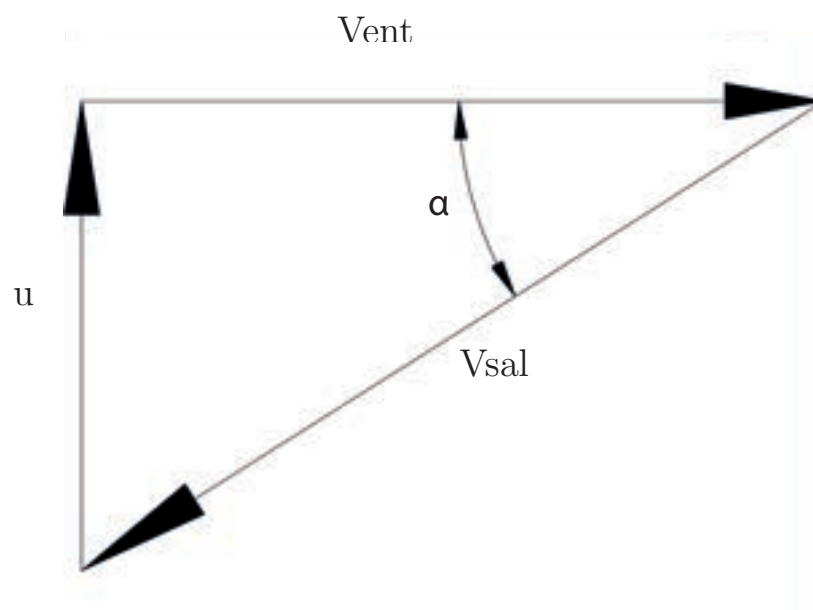


Figura 3.17: Triangulo de velocidades. Fuente: []

De la figura 3.17:

$$\tan \alpha = \frac{u}{V_{ent}} \quad (3.33)$$

$$u = V_{ent} \cdot \tan \alpha = \omega \cdot Y_c \quad (3.34)$$

suponiendo  $V_c = \frac{Q}{A}$  resulta de las ecuaciones 3.34 y 3.33:

$$u = \frac{Q \cdot \tan \alpha}{A} \quad (3.35)$$

Y de la ecuación 3.34:

$$\omega = \frac{Q \cdot \tan \alpha}{A \cdot Y_c} \quad (3.36)$$

Recordando, la potencia teórica de un tornillo era  $Pot = \omega \cdot T$  entonces:

$$Pot = \rho \cdot g \cdot L_b \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha \cdot Y_c \cdot \left( \frac{Q \cdot \tan \alpha}{A \cdot Y_c} \right) \quad (3.37)$$

Como aproximadamente  $\sin \beta = \frac{H}{L_b}$  (ver figura 1.16):

$$Pot = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot (\tan \alpha)^2 \quad (3.38)$$

Si la potencia teórica máxima es  $Pot_{m\acute{a}x} = \rho \cdot Q \cdot H \cdot g$ , con los datos que se obtuvieron hasta el momento y suponiendo un rendimiento del 80%:

$$\eta = \frac{Pot}{Pot_{m\acute{a}x}} = (\tan \alpha)^2 * 100\% = 80\% \quad (3.39)$$

Sustituyendo y despejando se obtiene el ángulo de inclinación de la hélice en el punto donde el torque es máximo:  $\alpha = 41,81^\circ \approx 42$ .

### 3.7. Volumen de balde

El punto donde el llenado del agua es óptimo es el punto donde las pérdidas por escurrimiento son cercanas a 0. El tornillo es flexible en cuanto al rango de caudales que puede manejar pudiendo funcionar hasta un 120% de llenado pero es necesario conocer la columna de agua límite en la que un exceso generaría pérdidas fluidodinámicas en la turbina.

El volumen del balde, estará definido por la ecuación vista en el Capítulo 2 (ecuación 2.3) de Nuernbergk y Rorres. Una vez se tiene este valor, se puede calcular la relación adimensional de volumen  $\nu$  pero para calcular la relación de volumen total es necesario otro parámetro que tiene en cuenta la velocidad axial ( $c_{ax}$  representada en la figura 1.16) de transporte de la siguiente expresión:

$$c_{ax} = \frac{\Lambda \cdot n}{60} \quad (3.40)$$

El estudio de Nuernenberk [24] proporciona una aproximación de la relación de volumen total que incluye el efecto de las dos pérdidas en el tornillo:

$$\nu_t = \frac{Q}{\pi \cdot R^2 \cdot c_{ax}} = \nu + \frac{Q_g}{\pi \cdot R^2 \cdot c_{ax}} + \frac{Q_o}{\pi \cdot R^2 \cdot c_{ax}} \quad (3.41)$$

siendo  $Q_f$  y  $Q_o$  las pérdidas por el gap entre tornillo-carcaza y por sobrellenado respectivamente y la suma de ambas es  $Q_p$ . Conociendo el punto de llenado óptimo es posible reducir las perdidas por sobrellenado  $Q_o$ .

Este nuevo volumen adimensional incluye el efecto de ambas corrientes de fuga, una modificación del volumen adimensional  $\nu_t$  dado por Rorres [23]. En el punto de llenado óptimo, el caudal de pérdida por sobrellenado ( $Q_o$ ) es igual a cero y la ecuación 3.42 se convierte simplemente en:

$$\nu_t = \nu + \frac{Q_o}{\pi \cdot R^2 \cdot c_{ax}} \quad (3.42)$$

Si se mirá la figura 1.16 en un plano perpendicular al eje del tornillo se vería:

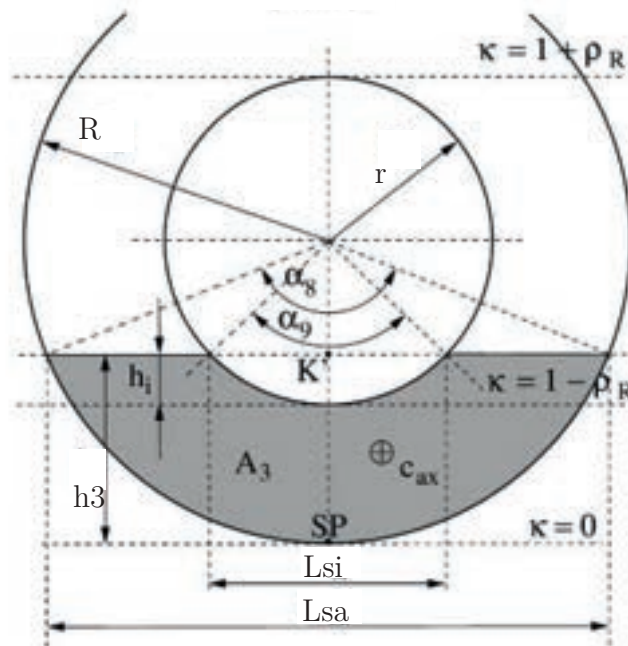


Figura 3.18: Corte de sección de modelo analítico de tornillo. Fuente: [24]

Nuernberk asume que bajo condiciones de estado estacionario el flujo complicado del agua dentro el tornillo rotatorio se puede aproximar mediante un flujo uniforme de altura constante  $h_3$  con la velocidad axial  $c_{ax}$  de la ecuación 3.40.

Si  $A_3$  es el área de sección transversal promedio del agua en el tornillo:

$$\nu_t = \frac{A_3}{\pi \cdot R^2} \quad (3.43)$$

Luego, la dependencia de  $\nu_t$  con  $h_3$  o de forma equivalente a la altura adimensional  $\kappa = \frac{H_3}{R}$ . Este parámetro representa el ratio entre la altura de agua simplificada y el radio exterior y al igual que con el diámetro exterior para definir una altura adimensional se debe seguir un paso iterativo.

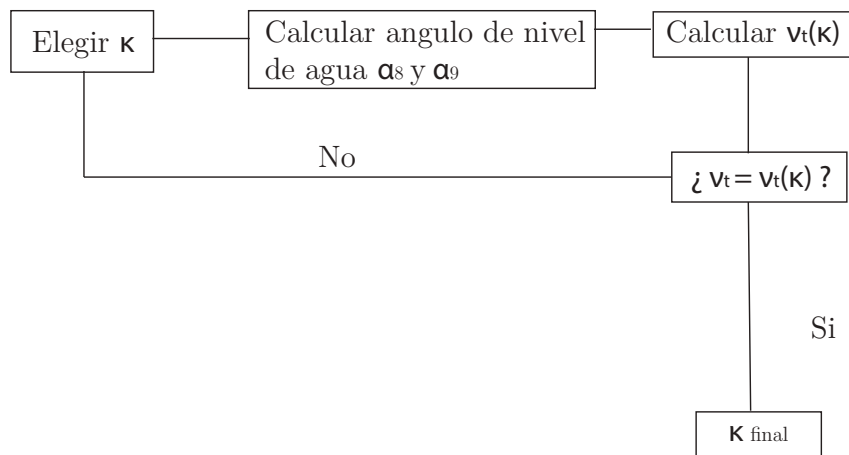


Figura 3.19: Pasos de proceso iterativo para obtener la altura dimensional  $\kappa$ . Fuente: Elaboración propia

Se debe establecer un valor inicial para empezar el proceso. Se utiliza la figura 3.20 entrando con  $\nu_t$  calculado anteriormente. El gráfico relaciona la altura dimensional con el  $\nu_t$  para diferentes relaciones de diámetros  $\delta$ .



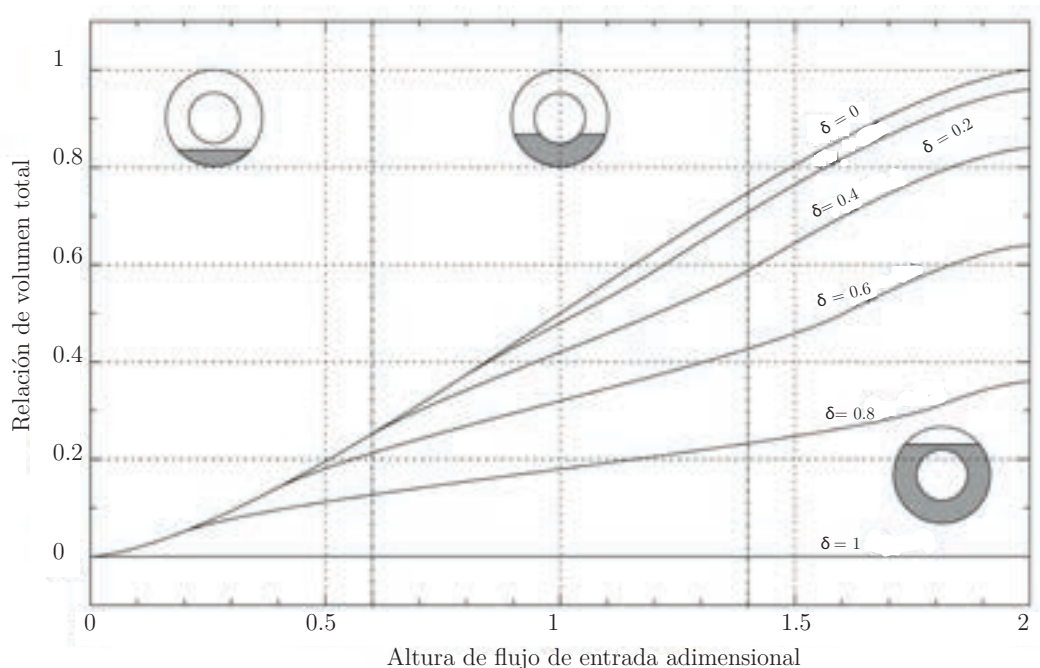


Figura 3.20: Cálculo de resultados de  $\nu$  vs.  $\kappa$  para distintas relaciones de radio. Las diferentes secciones mostradas son para  $\delta = 0,4$ . Fuente: [24]

A través del programa de MatLab (Ver Apéndice I) se calcularon todos los parámetros y con la ecuación de la curva dada por Nuernberk [24] se obtuvo la altura dimensional  $\kappa$ .

Por trigonometría los ángulos  $\alpha_8$  y  $\alpha_9$  definen el nivel del agua entre el cilindro interior y exterior. Para el cálculo se emplea:

$$\alpha_8 = 2 \cdot \arccos(1 - \kappa) \quad (3.44)$$

$$\alpha_9 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{1 - \kappa}{\delta}\right) \quad (3.45)$$

Ya con todos los datos necesarios se está en condiciones de obtener la relación de volumen total en función de la altura adimensional. Existen tres casos de estudio que dependen del régimen que tendrá la turbina. El primer caso es que el nivel del agua esté por debajo del centro del tubo, es decir está parcialmente lleno, el segundo es cuando corta el centro del tubo y el tercer caso es cuando está por encima. Para este proyecto se asume que el nivel rondará cercano al centro del tubo y se debe cumplir que  $0 < \kappa < (1 - \rho)$ , por lo tanto:

$$\nu_t = \frac{\alpha_8 - \alpha_9 \cdot \delta^2}{2 \cdot \pi} - \frac{(1 - \kappa)}{\pi} \cdot [\sqrt{1 - (1 - \kappa)^2} - \sqrt{\delta^2 - (1 - \kappa)^2}] \quad (3.46)$$

Este  $\nu_t(\kappa)$  es el utilizado para comparar con el anterior  $\nu_t$  realizando el proceso iterativo hasta que sean iguales.

### 3.8. Profundidad de la entrada de agua

Si se mira nuevamente la figura 1.16 la altura desde la compuerta al 25% hasta el suelo es de unos 1.925 [m]. Para obtener la altura hidráulica se le debe afectar con la proyección del radio de la siguiente manera:  $H_{hid} = 1,925 - R \cdot \cos \beta$ . Además se le restará unos 10 [cm] del apoyo en el nivel inferior contra el suelo. Cabe aclarar que el largo complementario del tornillo interior se calcula aproximadamente como  $\frac{1}{8} \cdot L_b$  dado de experiencias de diseños anteriores.

Además,  $h_1$  según la figura 1.16 será con la compuerta al 25% es decir unos 17,5 [cm] sobre la cota inferior de la compuerta.

Siguiendo con el desarrollo de los trabajos de Nuernberk y Rorres [24] se detallan los parámetros necesarios para determinar las alturas del fluido relacionadas con el funcionamiento de la turbina. A partir del valor de la altura adimensional se puede obtener directamente la altura simplificada  $h_3$ , considerada como una altura constante del agua que atraviesa las palas del tornillo. Esta altura puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$h_3 = \kappa \cdot d \quad (3.47)$$

Finalmente, se calcula el parámetro denominado factor de pérdidas hidráulicas ( $\epsilon$ ) el cual puede ser estimado aplicando la pérdida de altura Borda-Carnot mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = \left( \frac{\nu_t \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}}{\kappa \cdot \cos \beta \cdot b} - 1 \right)^2 \quad (3.48)$$

La altura de apoyo "W" estará dado por la siguiente ecuación:

$$W = h_1 - h_2 - \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{Q_u}{h_2 \cdot b} \right)^2 \cdot \left[ 1 + \epsilon - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^2 \right] \quad (3.49)$$

siendo  $h_1$  la altura de entrada del canal y  $h_2$  el nivel de entrada de agua al tornillo es decir será la entrada restandole el escalón de apoyo (W). La descarga del tornillo es un dato que se puede obtener y es necesario tenerlo en cuenta. Se define:

$$\tau = (1 + \delta) \cdot \sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\lambda}{\delta} \right)^2 \right) - \frac{2 \cdot \pi \lambda}{m}} \quad (3.50)$$

y la altura de descarga del tornillo será:

$$h_4 = R \cdot (\cos \beta) \cdot \tau \quad (3.51)$$

Finalmente la longitud del tornillo será:

$$L_b = \frac{H' + R \cdot \cos \beta - h_2}{\sin \beta} \quad (3.52)$$

### 3.9. Rendimiento y potencia

Para una aproximación de los valores de potencia que se manejan con este modelo de turbina se recurre al método semianalítico de Müller y Senior [29].

Según los trabajos de Muller, una expresión para el rendimiento de una turbina de Arquímedes muestra que es independiente de la velocidad y únicamente dependiente de la geometría.

$$\eta_{teo} = \frac{2 \cdot j + 1}{2 \cdot j + 2} \quad (3.53)$$

donde  $j$  es:

$$j = \frac{d_0}{\Delta d} \quad (3.54)$$

En la figura 3.21 se pueden ver los niveles de los distintos baldes entre aletas, es decir, el nivel del agua idealizado a los dos lados de una pala del tornillo. Aguas arriba la profundidad es la suma de  $\Delta d + d_0$  y aguas abajo el nivel de agua en contacto con la pala tiene una altura  $d_0$ .

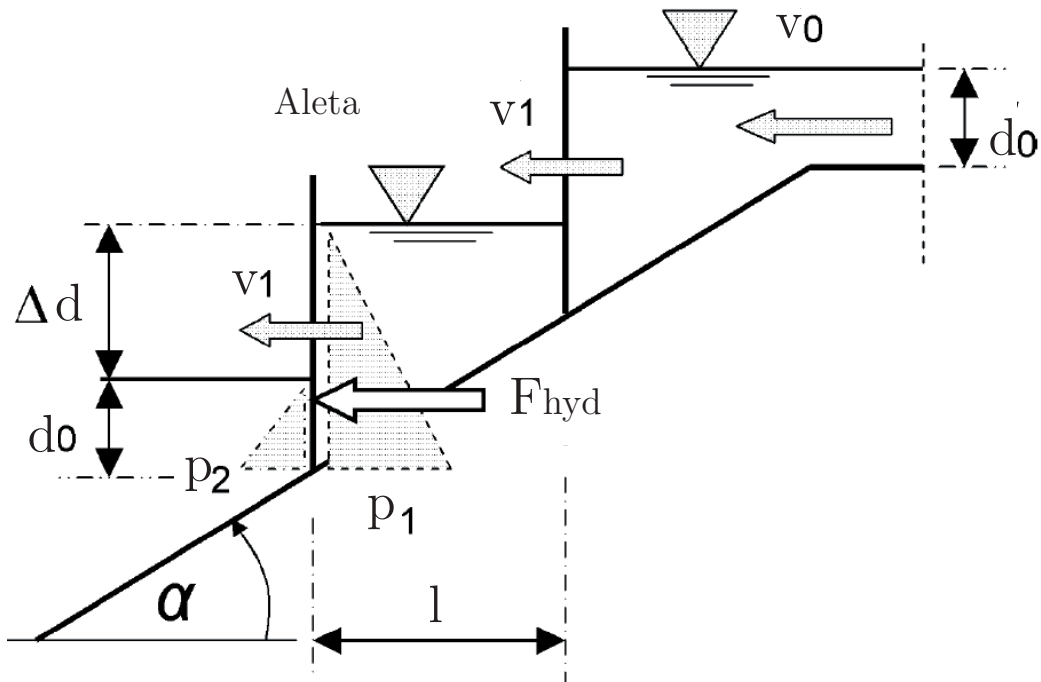


Figura 3.21: Nivel de agua entre aletas . Fuente: [29]

Estos valores pueden calcularse con los parámetros calculados anteriormente:

$$h_3 = \Delta d + d_0 \quad (3.55)$$

$$\Delta d = P \cdot \tan \beta \quad (3.56)$$

El rendimiento teórico es afectado por las pérdidas dadas por la propia turbina como se mencionó anteriormente. El rendimiento de pérdidas es:

$$\eta_{pér} = 1 - \frac{Q_p}{Q_u} = 1 - 0,06 = 0,94 \quad (3.57)$$

Por lo tanto, el rendimiento total de la turbina será:

$$\eta_{ta} = \eta_{teo} \cdot \eta_{pér} \quad (3.58)$$

La potencia mecánica desarrollada en el eje es producida por la rotación del tornillo. Esta potencia mecánica puede calcularse multiplicando el rendimiento total de la microturbina por la potencia hidráulica disponible en el salto de agua:

$$P_{mec} = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_{mec} \quad (3.59)$$

Para que las unidades sean Nm, la potencia mecánica está en W y la velocidad de rotación en  $\frac{rad}{s}$ . A partir de la potencia, el par puede obtenerse con este dato y la velocidad de rotación, teniendo en cuenta la ecuación 2.13:

$$C_{motor} + C_{fricción} = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (3.60)$$

En el caso teórico en que el par se divide de manera equitativa en cada aleta, el par en cada una será:

$$C_i = \frac{C_{motor}}{K} \quad (3.61)$$

A continuación se presenta un esquema del procedimiento general para el diseño del runner:

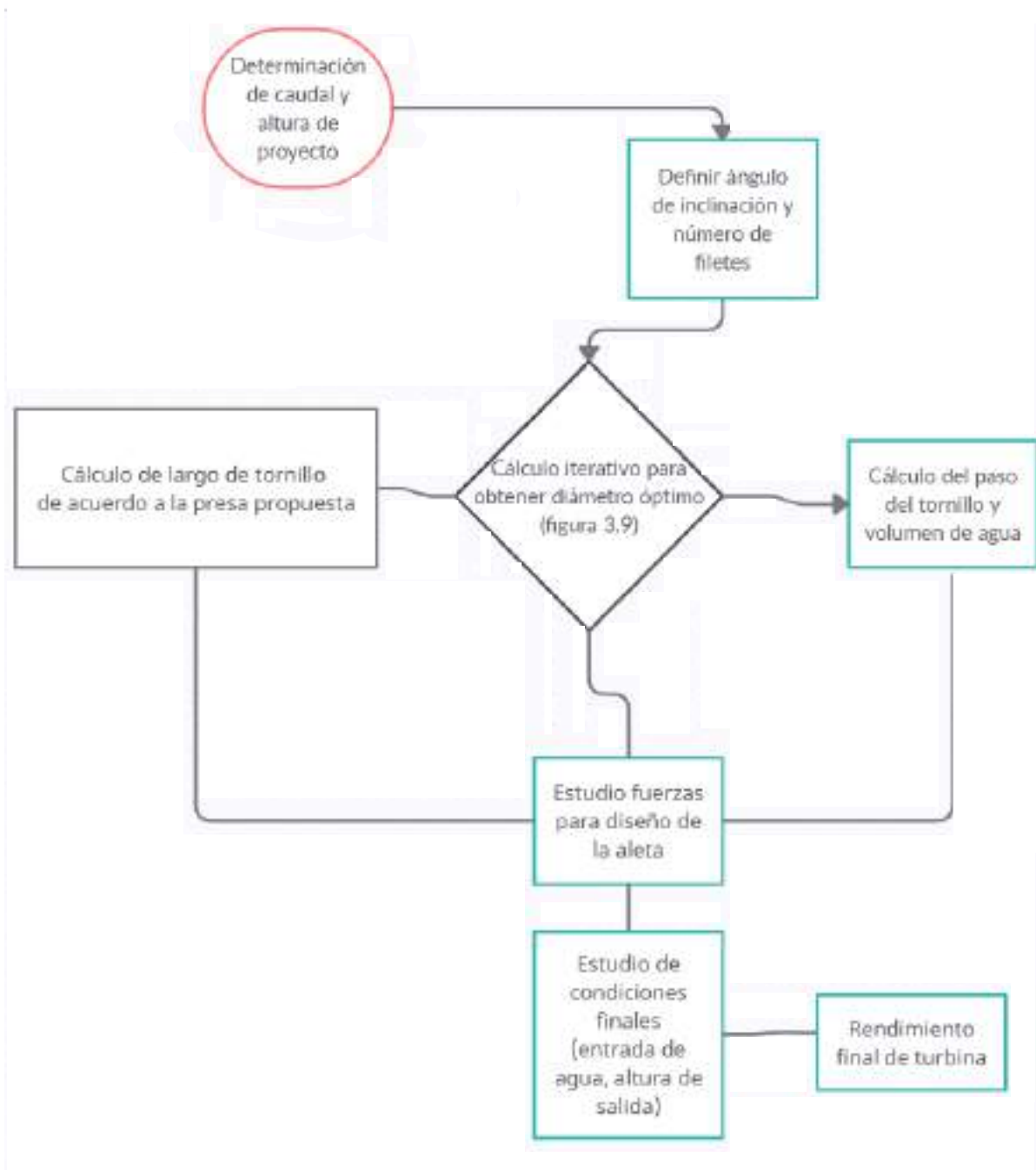


Figura 3.22: Procedimientos para diseño de turbina de Arquímedes óptima.

Los cálculos de todos los parámetros de diseño fueron realizados mediante un programa de MatLab (Ver Apéndice I) en el que se entra con el caudal y la altura neta hidráulica (se trata de un cálculo iterativo ya que la altura neta se obtiene de restar la componente del diámetro que no aporta a la potencia desarrollada).

A continuación, en la tabla 3.9 se detallan los datos obtenidos del diseño del tornillo:

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Salto neto	$H'$	1.17	m
Caudal medio	$Q$	0.65	$\frac{m^3}{s}$
Ángulo de inclinación de tornillo	$\beta$	30	°
Número de filetes	$m$	3	
Caudal útil	$Q_u$	0.6175	$\frac{m^3}{s}$
Caudal de pérdidas	$Q_p$	0.0325	$\frac{m^3}{s}$
Diámetro exterior de tornillo	$D$	1.53	m
Diámetro interior de tornillo	$d$	0.765	m
Longitud de tornillo	$L_b$	3.28	m
Largo completo de tornillo	$L_t$	3.75	m
Paso o avance del tornillo	$\Lambda$	1.53	m
Distancia entre dos palas	$P$	0.51	m
Ángulo interior entre pala y tornillo	$\alpha$	57.52	°
Ángulo exterior entre pala y tornillo	$\theta$	72.34	°
Ángulo del nivel de agua en el cilindro exterior	$\alpha_8$	163.45	°
Ángulo del nivel de agua en el cilindro interior	$\alpha_9$	146.55	°
Número de palas	$K$	$6,42 \approx 7$	°
Velocidad de rotación	$n$	42.16	R.P.M
Velocidad máxima de rotación	$n_{max}$	42.18	R.P.M
Relación de paso	$P_p$	1	
Relación de diámetros	$\delta$	0.5	
Relación de avance	$\lambda$	0.1838	
Volúmen por relación de giro	$\nu$	0.0574	
Relación de volúmen adimensional	$\nu_u$	0.312	
Relación de volúmen total	$\nu_t$	0.329	
Volúmen de agua en un ciclo de tornillo	$V_b$	0.879	$m^3$
Altura del agua del canal	$h_1$	0.175	m
Altura de apoyo	$w$	$0,01 \approx 0$	m
Altura del agua en el plano perpendicular del canal a la entrada	$h_2$	0.175	m
Altura de agua simplificada en plano del tornillo	$h_3$	0.655	m
Nivel de agua óptimo de descarga	$h_4$	0.6692	m
Altura adimensional (k)	$\kappa$	0.856	
Velocidad axial de transporte	$c_{ax}$	1.075	$\frac{m}{s}$
Diferencia de altura del nivel de agua en las palas	$\Delta d$	0.294	$m$
Rendimiento mecánico total	$\eta_{mec}$	0.736	
Potencia mecánica	$P_{mec}$	5.479	kW
Par del tornillo	$T$	1241.055	$Nm$
Par por pala	$T_i$	191.799	$Nm$

Tabla 3.9: Resumen de valores obtenidos de tornillo



### 3.10. Conclusión

Habiendo obtenido un proyecto de compuerta propuesta permitió obtener los datos iniciales para los cálculos del diseño iniciales es decir la altura utilizable y el caudal de desagüe. En colaboración nuevamente con el Departamento de geología y costas se recabaron datos de pluviometría, niveles históricos y demás datos de la laguna. Fue necesario tomar ciertos criterio de elección para lograr un modelo óptimo tomando como criterio el menor coste posible y capacidad de generación. Los tiempos de cálculos y simulación de resultados se vieron simplificados gracias el programa MatLAB. Este software permitía cambiar los parámetros y notar como impactaba en los resultados.

Se logró un resultado óptimo utilizando la bibliografía mencionada y se comparó proyectos ya realizados. Teniendo en cuenta el foco en economizar y adecuarse a la obra ya instalada, se obtuvieron resultados que estaban dentro de la franja prevista comparativamente con otros trabajos.



# Capítulo 4

## Sistema eléctrico de generación

### 4.1. Introducción

La obtención de energía eléctrica utilizable y de calidad es el principal objetivo de este trabajo. La generación aislada podría ser de gran ayuda en puntos lejanos donde la red tradicional es muy costosa. En este capítulo se trató el tema del equipamiento eléctrico necesario para obtener este beneficio.

### 4.2. Métodos de generación

El equipamiento de generación y su dimensionamiento está fuertemente asociado a las características de la demanda. En este proyecto la generación estará orientada a la generación conectada a la red. No hay ninguna restricción con respecto a generar en "CA" o "CC" aunque se descarta el uso de generadores en "CC" por que sus colectores provocan costes y frecuencias de mantenimiento elevadas con respecto a los generadores "CA". Además para una potencia determinada, la relación de potencia/peso es favorable para este tipo de equipo, reduciendo el esfuerzo en los apoyos. Dentro de los generadores alternativos podemos encontrar los asíncronos o de inducción (normalmente de jaula de ardilla) o sincrónicos.

#### 4.2.1. Generación en CA

Constituyen uno de los medios más comunes de producción de energía eléctrica ya que son una buena alternativa para abastecer consumos directos y de ser necesaria energía en corriente continua sólo es necesaria la incorporación de un rectificador. Estos generadores se clasifican en generadores sincrónicos y asíncrónicos o de inducción.

Se presentan diferentes alternativas por las desventajas y ventajas a carga variable.

## Generador sincrónico

Este generador tiene un rotor que utiliza corriente continua para generar un campo magnético, el que también puede ser reemplazado por un imán permanente. Se caracteriza además porque la frecuencia de las variables eléctricas que éste produce es proporcional a la velocidad de giro del rotor.

Ventajas:

- Puede ser auto excitado por electroimanes o imanes permanentes.
- No requiere mantención periódica.
- Más económicos que las máquinas de corriente continua.
- Fácil control de la tensión de salida manipulando la corriente de campo.

Desventajas:

- Necesitan de un equipo rectificador para alimentar algún banco de acumuladores.
- Dificultad para regular la frecuencia de la tensión a la salida.

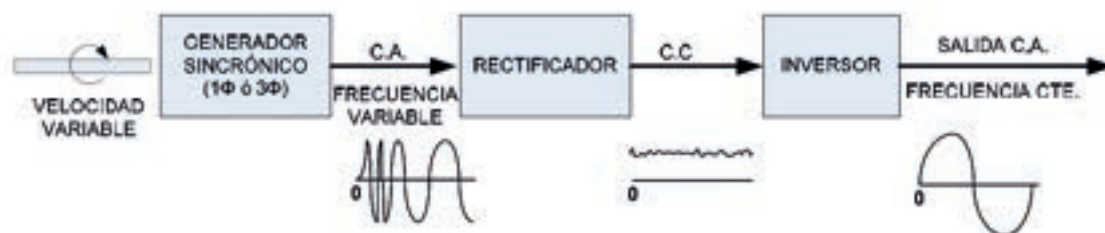


Figura 4.1: Esquema simplificado de generador sincrónico. Fuente: [34]

### Generador trifásico de conmutador

El sistema tiene una máquina con conmutador a la cual se le alimenta el campo trifásico con tensión de la frecuencia de red y se obtiene en el rotor una tensión de la misma frecuencia independiente de la velocidad del rotor. La magnitud de la tensión de salida debe ser controlada actuando sobre la magnitud de la tensión de alimentación del campo.

Ventajas:

- No existen problemas de regulación de frecuencia.
  
- Fácil control de la magnitud de la tensión a la salida.

Desventajas:

- Se requiere mantención periódica al poseer un conmutador.
  
- Se necesita de un rectificador para cargar baterías.
  
- Debe ser ocupado en conexión a la red de potencia ya que se debe disponer de tensión alterna para alimentar el campo.

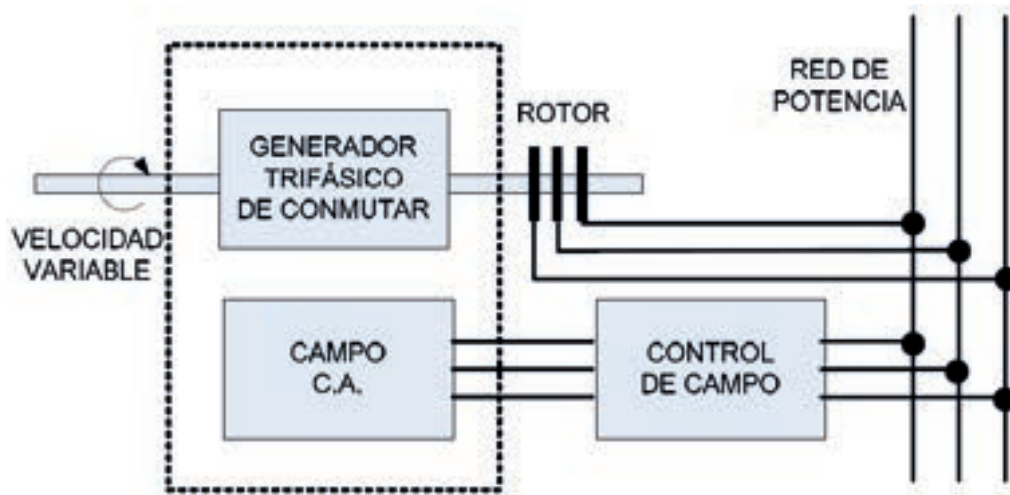


Figura 4.2: Esquema simplificado de generador de conmutador. Fuente: [34]

### Generador de inducción doblemente alimentado

Este sistema utiliza un generador de inducción de rotor bobinado de modo de aprovechar el efecto de variar la resistencia del rotor. Al hacer esto se puede modificar su característica de operación (potencia-velocidad) y se logra un funcionamiento más eficiente.

Ventajas:

- Alta eficiencia por la regeneración del rotor.
- Más económicas que la máquina de corriente continua.

Desventajas:

- Se requieren equipos adicionales, tales como rectificador e inversor para su propio funcionamiento y la carga de baterías.
- Es necesario que opere conectado a la red de potencia.

- Se necesita un sistema de control más elaborado para su correcto funcionamiento.

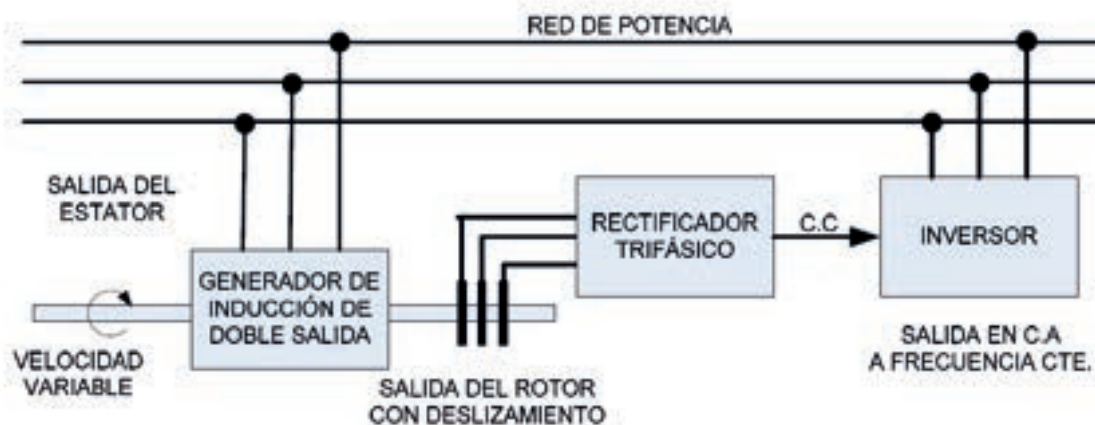


Figura 4.3: Esquema simplificado de generador de inducción de doble salida. Fuente: [34]

### Generador sincrónico de campo modulado

Se utiliza un generador sincrónico trifásico al cual se le alimenta el rotor con corriente alterna a la frecuencia que se desea obtener a la salida.

Ventajas:

- No hay problemas de regulación de frecuencia.

Desventajas:

- Presencia de armónicos.
- Para tener 3 fases es necesario realizar 3 modulaciones de forma separada.
- Se requieren equipos adicionales para su funcionamiento, tales como rectificador, inversor y filtros.

- Es necesario controlar la magnitud y fase de la tensión de excitación.

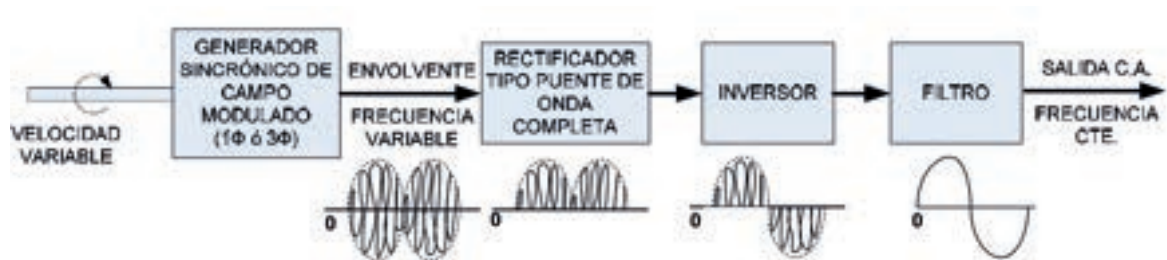


Figura 4.4: Esquema simplificado de generador sincrónico de campo modulado. Fuente: [34]

### Generador sincrónico de imanes permanentes Back to Back

La turbina hidráulica impulsa el PMSG (Generador síncrono de imanes permanentes) para generar voltaje de CA que se convertirá en voltajes de CC y CA para ajustar la frecuencia del sistema mediante el convertidor Back-to-Back, que se controla mediante el uso de vectores control, método de conversión por pulsos PWM, etc.



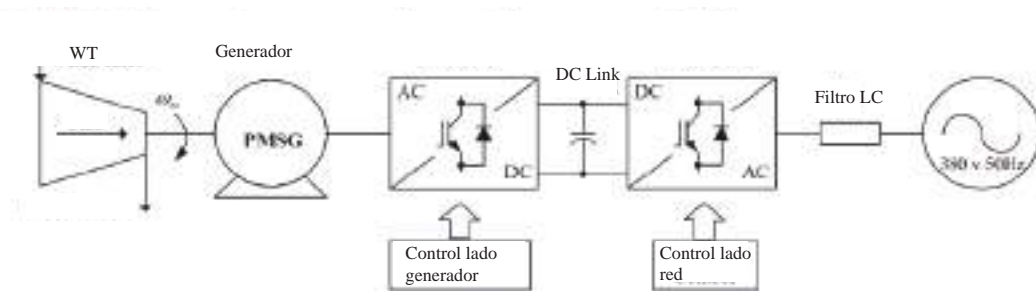


Figura 4.5: Esquema simplificado de generador sincrónico Back to Back. Fuente: [34]

Actualmente debido al auge de las energías renovables aisladas existen tecnologías en el mercado que permiten una conversión controlada de la energía hacia la red de distribución.

## 4.3. Tecnología aplicada

### 4.3.1. Motor sincrónico de imanes permanentes

El motor sincrónico de imanes permanentes es ampliamente utilizado para aplicaciones en las que se busque alto torque a bajas revoluciones. En una aplicación junto a una turbina, ésta y el generador están conectados para formar una unidad compacta y estructuralmente integrada.

El diseño simple y robusto del rotor de baja velocidad sin excitación o sistema de enfriamiento separado da como resultado un desgaste mínimo, requisitos de mantenimiento reducidos, costos de ciclo de vida más bajos y una vida útil prolongada. Una variedad

de estos motores se denominan direct drive (gearless) donde la ausencia de una caja de engranajes intensifica aún más este beneficio.

Las principales ventajas son:

- Alta eficiencia
  
  
- Simple y robusto
  
  
- Baja demanda de mantenimiento
  
  
- Confiabilidad

A diferencia del generador síncrono tradicional, la fuente del campo magnético en PMSG es el imán permanente. El problema de calentamiento solo ocurrirá en el estator, que es más fácil de enfriar porque no se necesita corriente para excitar el campo magnético en el rotor. Además, no serán necesarios en este tipo de generador las escobillas mecánicas lo que generará menos pérdida y peso.

### Modelo matemático del PMSG

La figura 4.6 muestra la vista transversal las tres fases de un PMSG de dos polos. Los devanados ABC en el estator tienen un ángulo eléctrico de  $120^\circ$  entre sí y la fuerza magnetomotriz "fa", "fb" y "fc" representan las direcciones estacionarias. El eje "d" representa la dirección de flujo del imán permanente que gira a la velocidad  $\omega_m$ .  $\theta_r$  representa el ángulo entre la dirección del flujo (eje d) y el eje a estacionario.

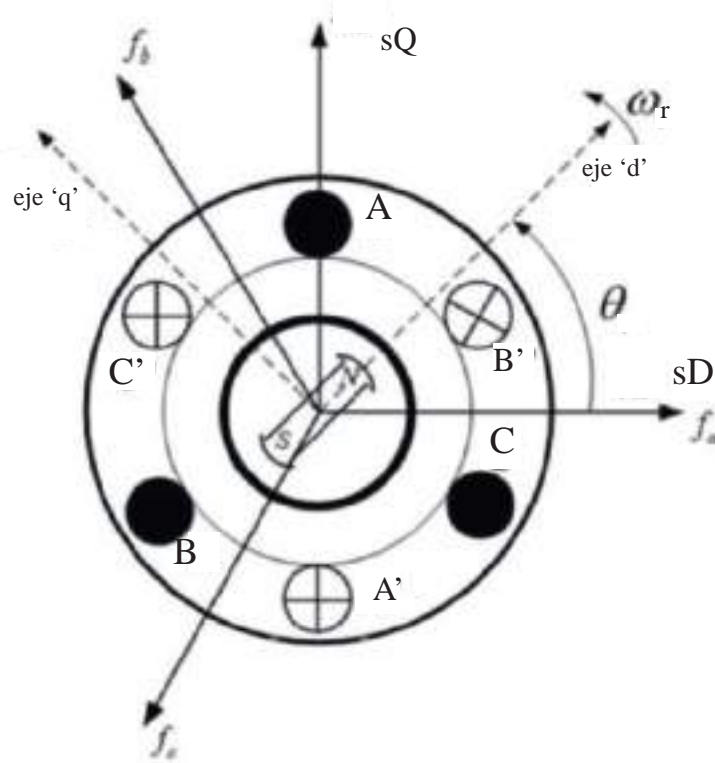


Figura 4.6: Esquema de PMSG. Fuente: [?]

Las ecuaciones de voltaje del estator del PMSG en el marco ABC con respecto a la corriente de fase y el flujo se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix} + \frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

$V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  son voltajes instantáneos del estator en fase ABC e  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  son las corrientes instantáneas del estator en fase ABC.  $R_s$  es la resistencia del devanado del estator en la fase ABC.  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  y  $\lambda_c$  son enlaces de flujo inducidos por las corrientes y el imán permanente.

La expresión de los flujos se puede expandir de la siguiente manera:

$$\begin{vmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix} + \lambda_m \begin{vmatrix} \cos(\omega_m) \\ \cos(\omega_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_m + \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

$L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  y  $L_{cc}$  son las autoinductancias de fase ABC y  $L_{ab}$   $L_{ac}$   $L_{ba}$   $L_{bc}$   $L_{ca}$   $L_{cb}$  son las inductancias mutuas respectivamente y  $\lambda_m$  es el enlace de flujo formado por el iman. Tanto las autoinductancias como las mutuas son funciones de la velocidad de rotación  $\omega_m$ . Una característica de tiempo tan variable de inductancia causa la dificultad en el cálculo y análisis [35]. Por lo tanto, el modelado del eje d-q es necesario.

**Modelo dq0** El modelo para maquinas sincronicas fue presentado por R.H Park por primera vez. En las variables estacionarias de PMSG, los voltajes del estator, las corrientes y los enlaces de flujo dependen del tiempo. El eje directo (eje d) es la dirección del flujo magnético del rotor y el eje de cuadratura (eje q) es perpendicular al eje d. Bajo este plano d-q, se puede eliminar la característica de tiempo variable. La transformación se muestra de la siguiente manera:

$$\begin{vmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{vmatrix} = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos(\omega_m t) & \cos(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_m t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega_m t) & -\sin(\omega_m t) - \frac{2\pi}{3} & -\sin(\omega_m t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

La transformación inversa:

$$\begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\omega_m t) & -\sin(\omega_m t) & 1 \\ \cos(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega_m t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega_m t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

$V_{dq0}$  representa los voltajes en el marco rotacional d-q. La transformación también puede ser aplicada a los enlaces de flujo y corriente del estator. Al combinar el modelo de ABC y las transformaciones d-q, el modelo del PMSG en el eje d-q se puede expresar de la siguiente manera:

$$V_d = i_d R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (4.5)$$

$$V_q = i_q R_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_q i_q + \omega_e \lambda_m \quad (4.6)$$

$$V_0 = i_0 R_s + L_0 \frac{di_0}{dt} \quad (4.7)$$

$V_d$ ,  $V_q$ ,  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  representan el voltaje, la corriente y la inductancia respectivamente en el eje de rotación d-q.  $\lambda_m$  es el flujo producido por el material de imán permanente. De estas ecuaciones, el circuito equivalente en el plano d-q es:

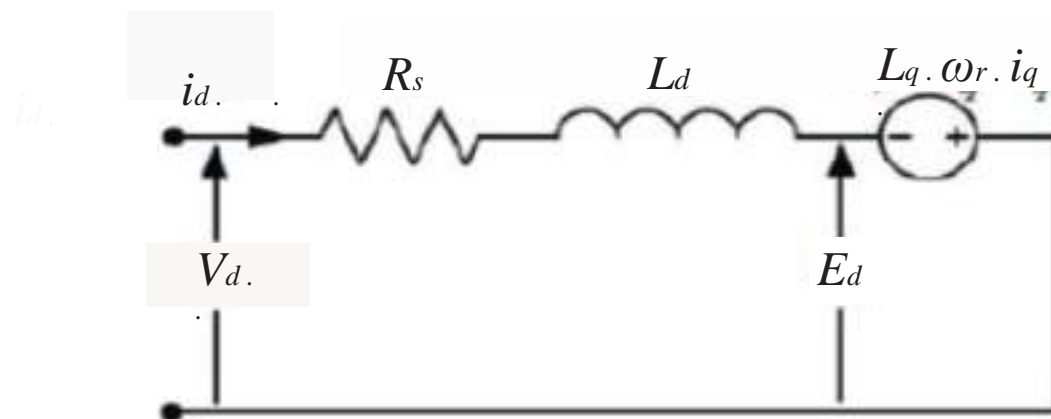


Figura 4.7: Circuito equivalente de PMSG. Fuente: [35]

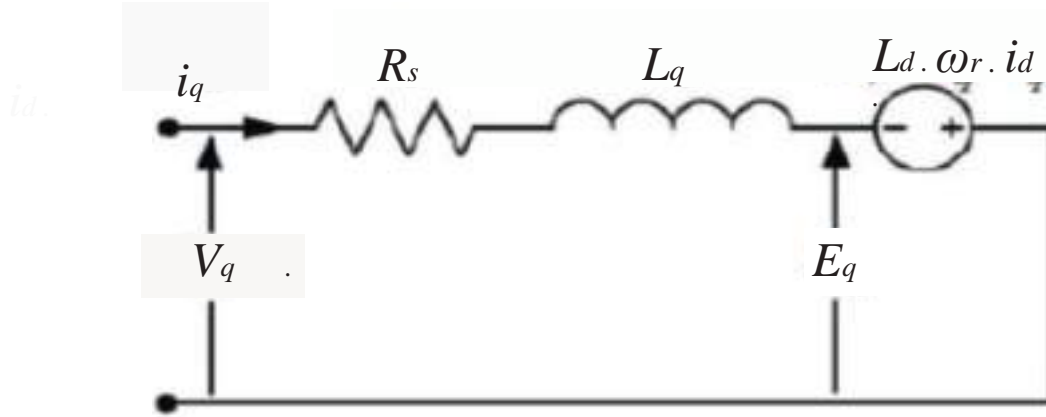


Figura 4.8: Circuito equivalente de PMSG. Fuente: [35]

Desde un punto de vista de control, el generador PWM y los sistemas excitadores tienen en cuenta una función de transferencia de primer orden  $G_d(s)$

$$G_d(s) = \frac{v_{out}}{v_{ctrl}} = \frac{1}{1 + T_a(s)} \quad (4.8)$$

donde  $v_{ctrl}$  es el voltaje de control de entrada y  $v_{out}$  es la salida.  $T_a$  es el retardo de tiempo debido al cálculo y tiempo generacional. Para simplificar, tomamos  $T_a = \frac{1}{f_{PWM}}$  para ambos sistemas.

Si se define:

$$\Delta v_q = v_{tq} - v_{sq} - \omega_s L_r i_d \quad (4.9)$$

$$\Delta v_d = v_{td} - v_{sd} - \omega_s L_r i_d \quad (4.10)$$

Entonces  $i_q$  e  $i_d$  responden a  $v_q$  y  $v_d$  respectivamente, a través de una función transferencia simple de primer orden  $F_r(s)$ :

$$F_r(s) = \frac{i_q}{\Delta\nu_q} = \frac{i_d}{\Delta\nu_d} = \frac{1}{R_r} \cdot \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad (4.11)$$

Donde  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ . El subíndice "r" corresponde al rotor.

En cuanto al par eléctrico y el torque,  $E_d$  y  $E_q$  son la fuerza electromotriz inversa en el eje d-q respectivamente y pueden ser escritas como:

$$E_d = -\omega_e \cdot L_q \cdot i_q = \omega_e \cdot \lambda_q \quad (4.12)$$

$$E_q = \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \lambda_m = \omega_e \cdot \lambda_d \quad (4.13)$$

La potencia mecánica generada por el PMSG expresada por la tensión del eje d-q y la corriente se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot (E_d \cdot i_d + E_q \cdot i_q) \quad (4.14)$$

Combinando la ecuación podemos obtener:

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot (\omega_e \cdot \lambda_d \cdot i_q - \omega_e \cdot \lambda_q \cdot i_d) \quad (4.15)$$

La expresión del par electromagnético es:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_m}{\omega_e} \cdot \frac{p}{2} \quad (4.16)$$

Donde  $T_e$  es el par electromagnético,  $\omega_m$  es la velocidad de rotación mecánica y "p" es la cantidad de polos.

A continuación se presenta la relación entre potencia y generación de acuerdo a caudal y altura utilizado para variar la entrada en la simulación.

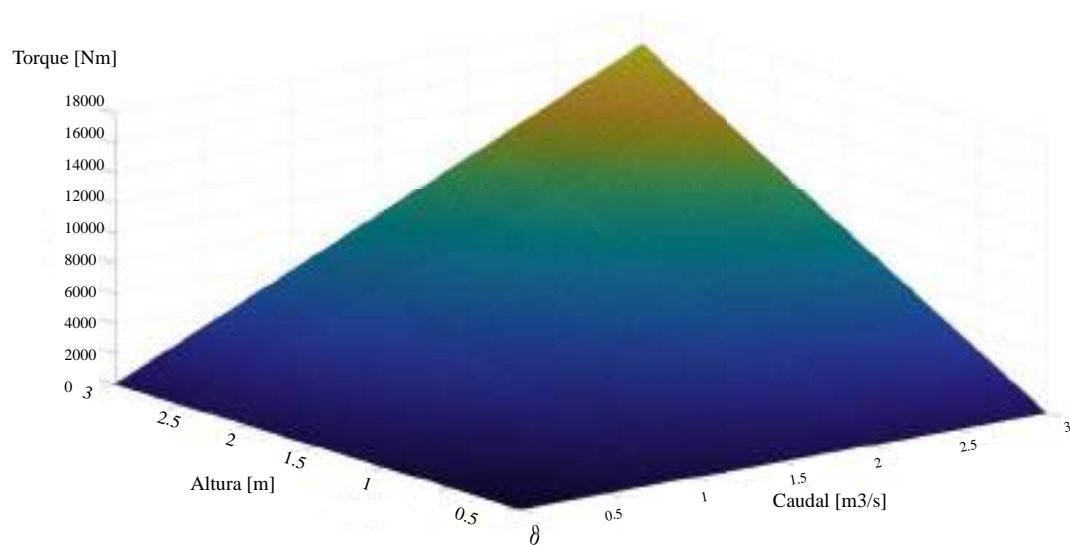


Figura 4.9: Torque de PMSG. Fuente: Elaboración propia

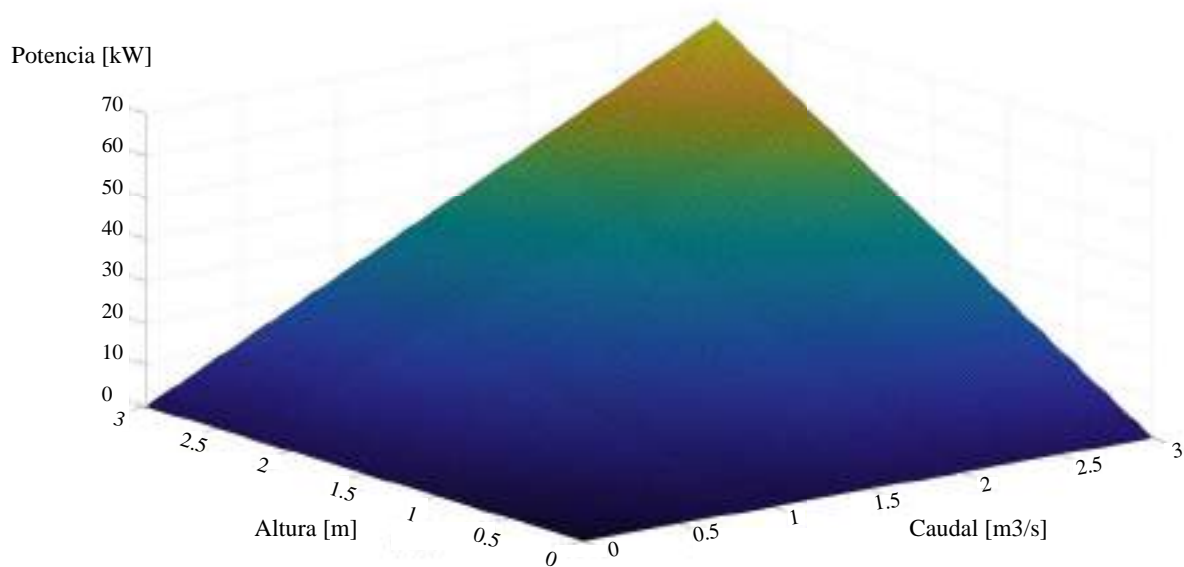


Figura 4.10: Potencia de PMSG. Fuente: Elaboración propia



El motor utilizado se encuentra en el apéndice numero "C". El modelo utilizado para la simulación será el propio de la librería PowerSim de Simulink y para la conversión a d-q mediante un bloque.

#### 4.4. Conversión y control

El diagrama de la conversión simplificada se puede ver en la figura 4.5 donde básicamente estará conformado por un rectificador de puente trifásico y un inversor para conseguir una onda senoidal alterna. Lógicamente ambos convertidores deben ser controlados por un driver de control que tome los valores de referencia y compare con los instantáneos para actuar.

Los generadores eléctricos se pueden conectar a la red eléctrica directamente (operando a velocidad fija) o utilizando un convertidor de potencia B2B (que funciona a velocidad variable) que incluye dos inversores, un lado del generador (Gen-Side) y un inversor del lado de la red (Grid-Side), conectados a través de una línea de CC de suavizado con un condensador como se ve en la fig. 4.11

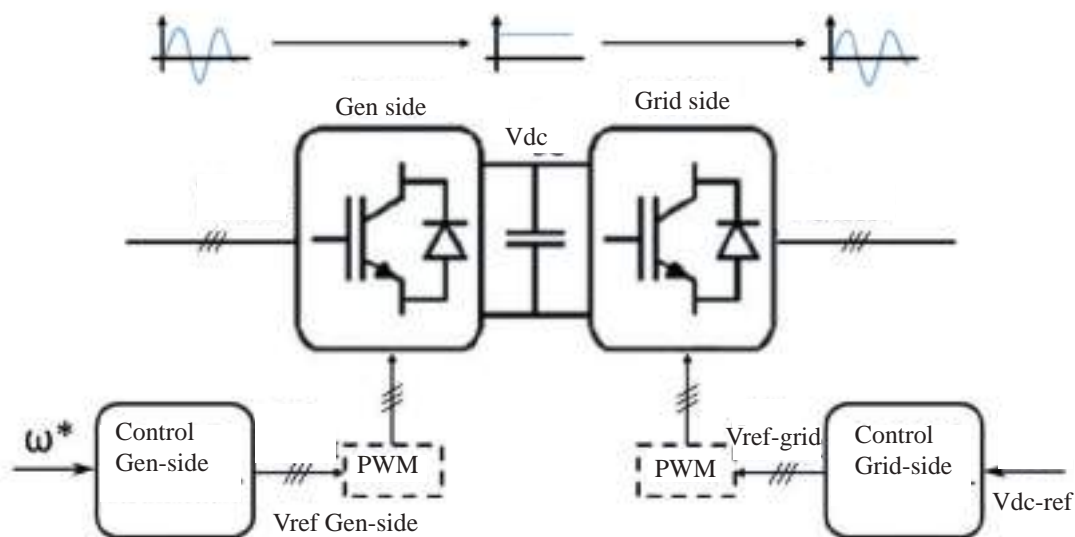


Figura 4.11: Convertidor B2B. Fuente: [36]



$$L_d \frac{di_{std}}{dt} = -R_s i_{std} + \omega_e L_q i_{stq} - \omega_e L_{md} i_f - \nu_{stq} \quad (4.18)$$

$$L_f \frac{di_f}{dt} = -R_f i_f - L_{md} \frac{di_{std}}{dt} + \nu_f \quad (4.19)$$

siendo  $i_f$  la corriente de campo e  $i_{st}$  del estator. Si se define  $\Delta\nu_{stq}$  y  $\Delta\nu_{std}$  como:

$$\Delta\nu_{stq} = \nu_{stq} - \omega_e L_d i_{std} - \omega_e L_{md} i_f \quad (4.20)$$

$$\Delta\nu_{std} = \nu_{std} + \omega_e L_q i_{stq} \quad (4.21)$$

Luego, la función transferencia  $F_q$  y  $F_d$ :

$$F_{stq}(s) = \frac{i_{stq}}{\Delta\nu_{stq}} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_q s} \quad (4.22)$$

$$F_{std}(s) = \frac{i_{std}}{\Delta\nu_{std}} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_d s} \quad (4.23)$$

donde  $\tau_q = \frac{L_q}{R}$  y  $\tau_d = \frac{L_d}{R}$  y de acuerdo a la ecuación 4.19 responde a función de transferencia de primer orden.

$$F_f(s) = \frac{i_f}{\nu_f} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_f s} \quad (4.24)$$

Y el torque electromecánico dinámico queda expresado por la referencia dq de posición:

$$T_c = \frac{3}{2} P [-L_{md} i_f i_{stq} + (L_{mq} - L_{md}) i_{stq} i_{std}] \quad (4.25)$$

Si  $i_{std}$  se regula a cero y si se mantiene la corriente de campo constante,  $T_e$  es una función lineal de  $i_{stq}$ . La velocidad mecánica  $\omega_m$  está relacionada con el par mediante la ecuación mecánica de la máquina síncrona

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m + T_e + T_{damp} \quad (4.26)$$

donde  $T_m$ ,  $T_e$  y  $T_{damp}$  son el par mecánico, electromagnético y de amortiguación, respectivamente. Como resultado, la velocidad de la máquina responde a la corriente del eje "q" a través de un función de transferencia simple de primer orden  $G_w$  (s):

$$G_w(s) = \frac{\omega_m}{i_{stq}} = -\frac{3PL_{md}i_f}{2Js} \quad (4.27)$$

Se usará para la simulación controladores proporcionales-integrales (PI), porque son fáciles de implementar y ampliamente utilizados en la industria. Además, garantizan que no hay error de estado estable debido a una entrada escalonada.

El esquema utilizado en simulink se presenta en la figura 4.12 donde se pueden ver los parámetros de entrada:

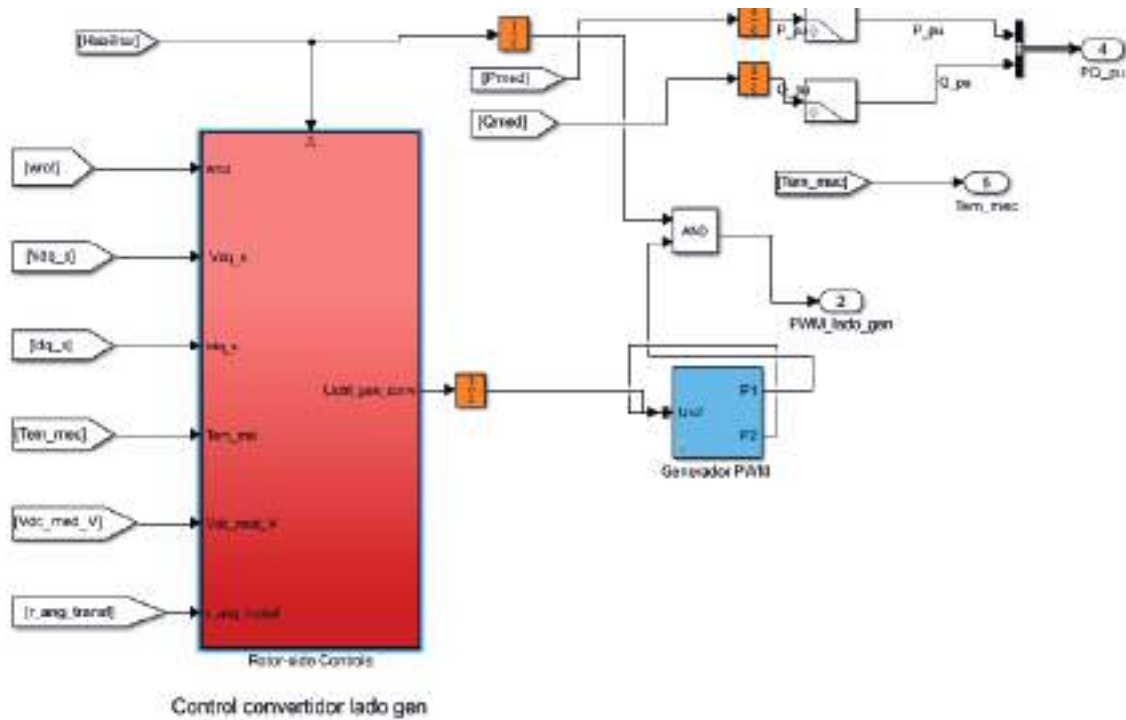


Figura 4.13: Control lado generador Simulink. Fuente: [44] [36] [39] [40]

#### 4.4.2. DC Link

La selección del capacitor de un convertidor B2B es de importancia porque de este dependerá el ripple del voltaje, la vida útil y control rápido de la tensión del circuito intermedio. Tienen flujo de potencia bidireccional, junto con un ancho de banda de control muy amplio principalmente limitado por el filtro de línea. Si esas propiedades se utilizan para la regulación del enlace de voltaje DC, el capacitor de enlace de CC puede ser bastante pequeño.

La corriente de entrada es switchheada mediante pulsos con la frecuencia de conmutación del convertidor. Esto induce una ondulación de voltaje DC. Esta ondulación de voltaje debe hacerse lo suficientemente pequeña para que el voltaje sea virtualmente constante durante un período de cambio. Esto establece un límite inferior en el tamaño del condensador [40].

	Voltaje DC			
\Delta (%)	600	650	700	750
2	0.79	1.53	1.96	2.18
1	1.59	3.07	3.91	4.37
0.5	3.18	6.14	7.83	8.73
0.2	7.94	15.3	19.6	21.8

Tabla 4.1: Tamaño de capacitor por potencia nominal en  $\mu F/kW$  [44]

Teniendo en cuenta esto, la capacitancia  $C$  se elige como:

$$C = \frac{S}{4\pi f_{min} \nu_{dc} \Delta \nu_{dc}} \quad (4.28)$$

donde  $S$  es la potencia aparente del convertidor,  $f_{min}$  es el mínimo entre la frecuencia nominal de red y el generador, y  $\Delta \nu_{dc}$  es el valor pico a pico permitido de ondulación de tensión en el enlace de CC (normalmente es e 2% de  $\nu_{dc}$ ) [37].

Sin embargo, existe un estimado de valores para el capacitor recomendado. En la tabla los lados AC y DC de la red estan relacionados mediante la tabla 4.1.

La tabla enumera el tamaño necesario del condensador expresado en  $\mu F / kW$  convertidor potencia, para un convertidor conectado a una red eléctrica de 400V que tiene un 10 kHz de frecuencia de conmutación aparente. Según diferente bibliografía de los tamaños utilizados de condensadores de enlace de CC y el cálculo estimativo según la ecuación 4.28, se utilizará un condensador de  $10mF$  F para este proyecto [41].

$$\nu_{dc} i_{dc,grid} = \frac{3}{2} \nu_{sd} i_{sd} \quad (4.29)$$

Estos condensadores pueden absorber las fluctuaciones instantáneas de potencia activa, suavizando el flujo de potencia de salida y funciona como fuente de voltaje para los convertidores. Las variaciones de la tensión DC en el capacitor se puede obtener de la siguiente manera:

$$C \frac{d\nu_{dc}}{dt} = -i_{dc,grid} - i_{dc,gen} \quad (4.30)$$

El diseño del controlador de voltaje DC-Link, se considera  $i_{dc,gen}$  como una perturbación y se suele aproximar  $\nu_{sd} \approx \nu_{dc}/2$ . Luego,  $\nu_{dc}$  responde a  $i_d$  a través de una función transferencia de primer orden  $G_v(s)$ ,

$$G_v(s) = \frac{\nu_{dc}}{i_d} = -\frac{3}{4C} \frac{1}{s} \quad (4.31)$$

### 4.4.3. Sensor de velocidad

La forma más simple de medir la velocidad del eje del alternador es la utilización de un sensor óptico que permita detectar las variaciones en la superficie de un encoder. Por ejemplo un led infrarrojo y un receptor, uno frente a otro, entre los cuales pasa un disco con una cantidad determinada de perforaciones. Al girar el disco se produce una interferencia entre el receptor y el diodo produciendo una señal cuya frecuencia será equivalente a la velocidad de rotación del eje.

Los detalles del encoder seleccionado se presentan en el apéndice "3".

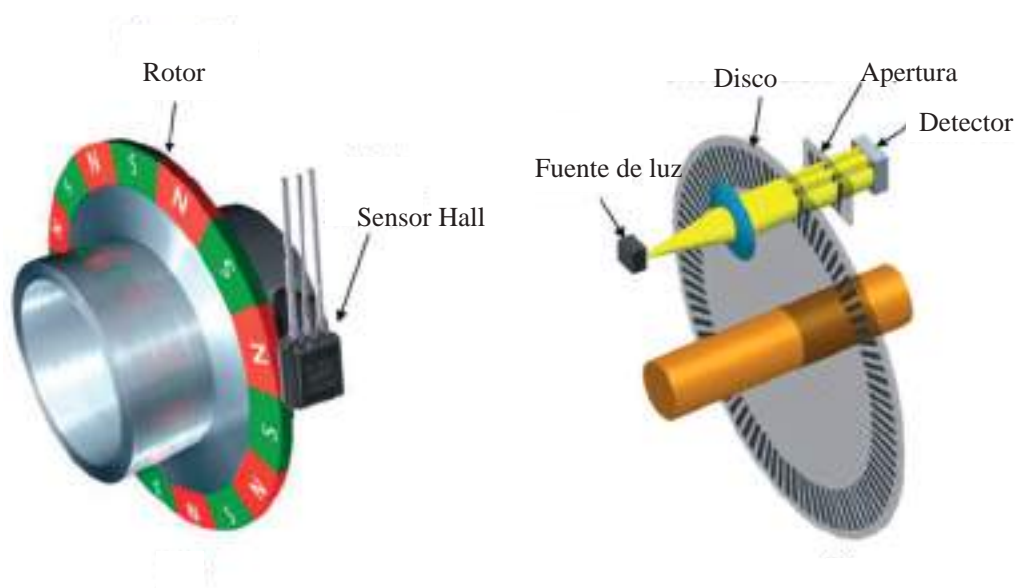


Figura 4.14: Esquema de encoder.

### 4.4.4. Circuito de protección

La protección de la carga es siempre un punto crítico que no se puede descuidar. Se utiliza de forma intensiva el sistema denominado palanca o Crow-bar, siendo un conjunto de switches bidireccionales conmutados en serie con una resistencia; este sistema se coloca en paralelo con la salida del convertidor, y tiene la función de proteger la carga de una condición incorrecta. Una apertura tentativa de la ruta de la corriente de carga por el

convertidor de potencia normalmente activa el sistema de palanca para evitar dañar la carga.

Los tiristores se eligen, ya que una vez configurados son conductores (una detección de sobretensión en el sistema del Crow-bar activa los interruptores), y permanecerán conductores mientras haya corriente de carga. Algunos sistemas también utilizan MOSFET de potencia, con la necesidad de garantizar que siempre estén controlados.

El diseño de dicho sistema, aunque no sea complejo, debe garantizar el funcionamiento seguro de los componentes. Se colocará el condensador en paralelo con el sistema de Crow-bar, limitando  $\frac{dV}{dt}$  a través de él para que la velocidad de cierre del interruptor, en serie con la resistencia del Crow-bar, sea compatible con el voltaje proveniente del Crow-bar, el módulo de potencia y finalmente el circuito [40] [41].

#### 4.4.5. Control lado red (grid-side)

El inversor de conexión a la red juega un papel importante en la generación de energía distribuida conectada a la red porque es el convertidor el que controla la calidad de la energía entregada a la red. La sincronización con la red pública es la principal preocupación del diseño de control del inversor porque es necesario regular la frecuencia y el voltaje de la red. Si la salida del inversor no puede cumplir con los criterios de conexión a la red local, no se permitirá la entrega de energía. En nuestra topología, el inversor de conexión a red se utiliza para regular la tensión del bus de CC y convertir la potencia activa y reactiva desde el lado de CC a la red de CA.

Para garantizar que toda la potencia activa que viene desde el convertidor del lado del generador se transfiere instantáneamente a la red, la tensión del circuito intermedio debe mantenerse constante. En segundo lugar, para poder soportar activamente la red, el convertidor debe poder regular la potencia reactiva alimentado a la red.

Hay dos tipos de inversores: inversor de fuente de voltaje (VSI) y de corriente (CSI). El VSI se usa más comúnmente en generación con conexión a la red. Se pueden dividir en dos tipos: inversor modulado por ancho de pulso (PWM) y modulado por vector espacial (SVM). A continuación se ve el diagrama en bloques del controlador de lado red. Para este proyecto se utilizará el método a través de PWM [40].

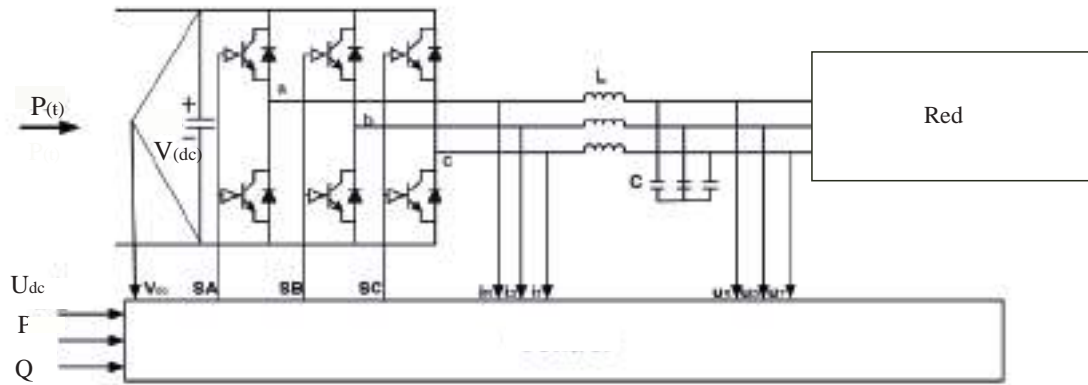


Figura 4.15: Esquema controlador lado red. Fuente: [40]



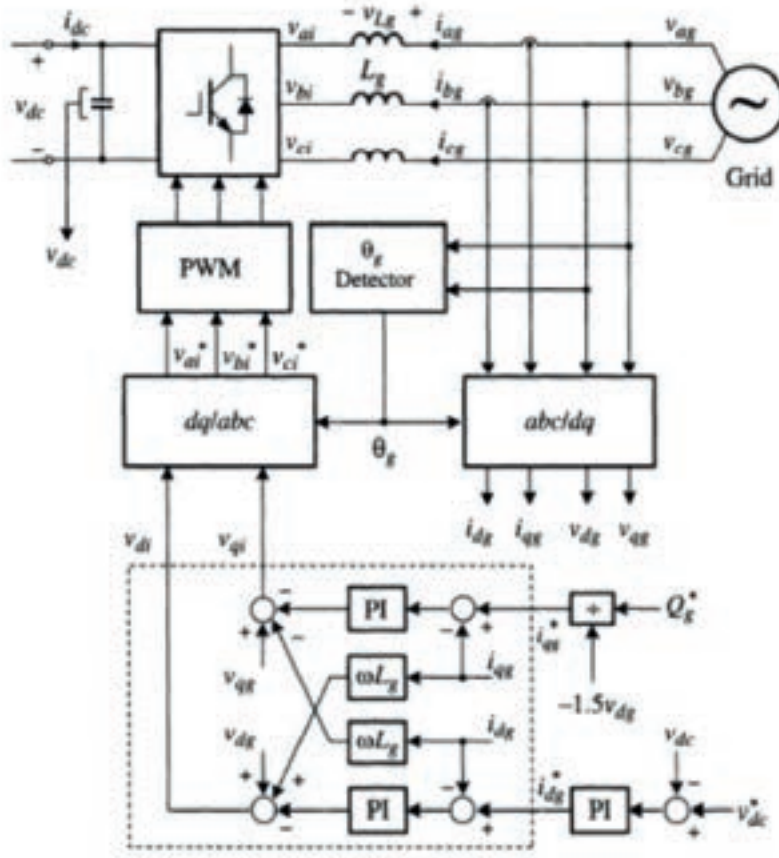


Figura 4.16: Esquema de bloques controlador lado red. Fuente: [40]

La ecuación describe el voltaje de salida del inversor y la corriente de la red es:

$$v(t) = e_t + R + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.32)$$

tanto  $e_t$ ,  $v(t)$  como  $i(t)$  son vectores espaciales de tensión y corriente obtenido por la función de interruptor:

$$p(t) = \frac{2}{3}(p_a(t) + \alpha p_b(t) + \alpha^2 p_c(t)) \quad (4.33)$$

Donde  $p_a(t)$ ,  $p_b(t)$  y  $p_c(t)$  pueden ser solo 0 o 1 dependiendo del estado del switch y  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Por la transformación de Park, para controlar la potencia activa y reactiva del inversor, la expresión de potencia en el marco síncrono d-q se da como:

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}) \quad (4.34)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(\nu_{qg}i_{dg} - \nu_{dg}i_{qg}) \quad (4.35)$$

Si el plano "d-q" se selecciona al azar, habrá problema de acoplamiento debido al producto cruzado del componente del eje "d" y el eje "q". Si se fuerza al eje d para alinear la fase y rotar a la velocidad sincrónica, el voltaje "q" se volverá cero por esta sincronización [35].

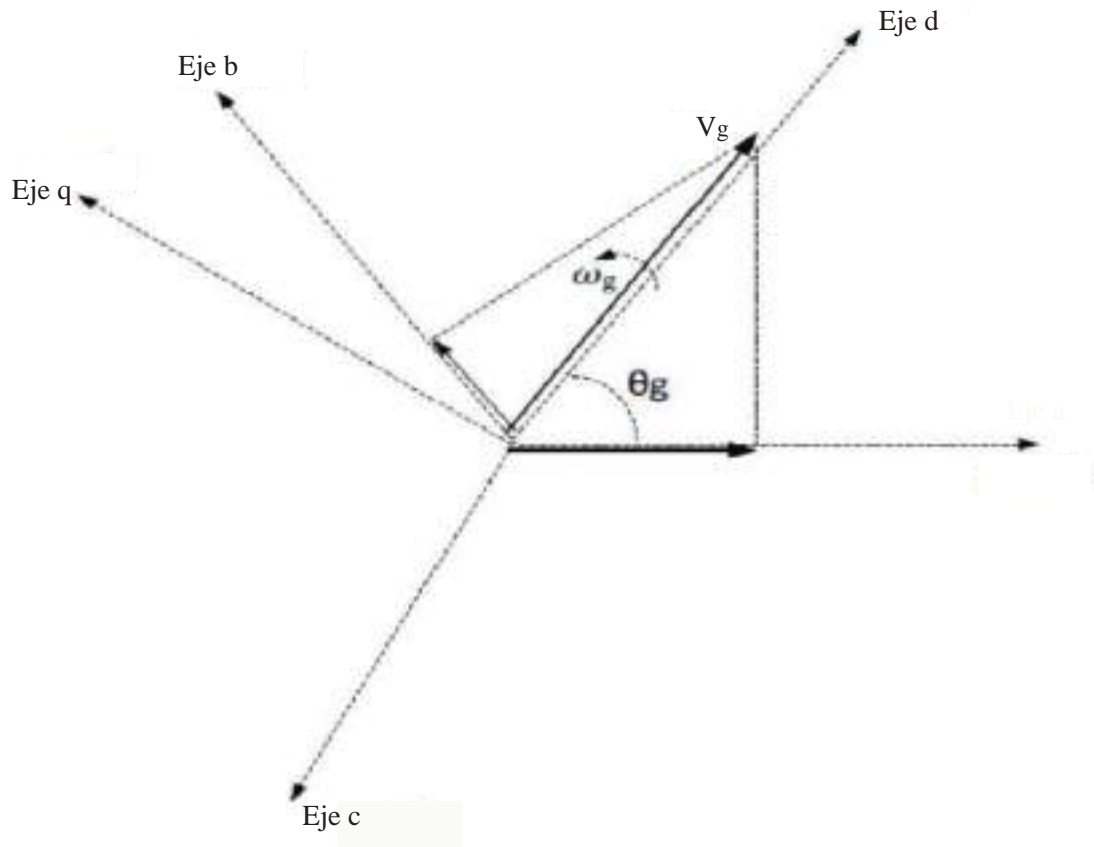


Figura 4.17: Descomposición de plano ABC y plano d-q rotacional con velocidad  $\omega_g$  y una fase aleatoria de ángulo  $\theta_g$ . Fuente: [35]

La fase "a" no tiene descomposición en el eje "q" porque el eje "d" está alineado con él. La parte de descomposición de la fase "b" y la fase "c" se cancelarán entre sí ya que hay 120° entre una y otra. Por tanto, tenemos:

$$V_{dg} = V_g \quad (4.36)$$

$$V_{qg} = 0 \quad (4.37)$$

Reemplazando en 4.38 y 4.39

$$P_g = \frac{3}{2}(\nu_{dg}i_{dg}) \quad (4.38)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2}(\nu_{dg}i_{qg}) \quad (4.39)$$

Podemos ver que la corriente del eje "q" es proporcional a la potencia reactiva de la red ya que el voltaje de la red es un valor fijo. De esta forma, se establece una referencia para controlar la potencia reactiva enviada desde el inversor:

$$i_q^* = \frac{Q_g^*}{-\nu_{dg}} \quad (4.40)$$

Y si despreciamos la pérdida en el inversor:

$$P_g = \frac{3}{2}(\nu_{dg}i_{dg}) = \nu_{dc}i_{dc} \quad (4.41)$$

De la ecuación 4.41 se obtiene los estados en el plano ABC:

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{e_j - \nu_j}{L} \quad (4.42)$$

Donde  $j = a, b, c$  y  $L$  es el inductor de línea y se considera el mismo valor en cada fase. Transformando la ecuación de estado en el plano "d-q" tenemos:

$$\frac{di_{dg}}{dt} = \frac{e_{dg} - \nu_{di} + \omega_g L_g i_{qg}}{L_g} \quad (4.43)$$

$$\frac{di_{qg}}{dt} = \frac{e_{qg} - \nu_{qi} + \omega_g L_g i_{dg}}{L_g} \quad (4.44)$$

Después de la transformación de Park, hay un acoplamiento cruzado con la corriente del eje "d" y el eje "q". El controlador PI no será preciso debido al acoplamiento. Por lo tanto, necesitamos restar el término de acoplamiento cruzado y obtener la siguiente ecuación para el voltaje d-q con un controlador PI:

$$V_{di} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{dg}^* - i_{dg}) + \omega_g L_g i_{qg} + e_{dg} \quad (4.45)$$

$$V_{di} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{qg}^* - i_{qg}) + \omega_g L_g i_{dg} + e_{qg} \quad (4.46)$$

Donde  $K_p$  y  $K_i$  son es la ganancia proporcional e integral para el controlador PI [35].

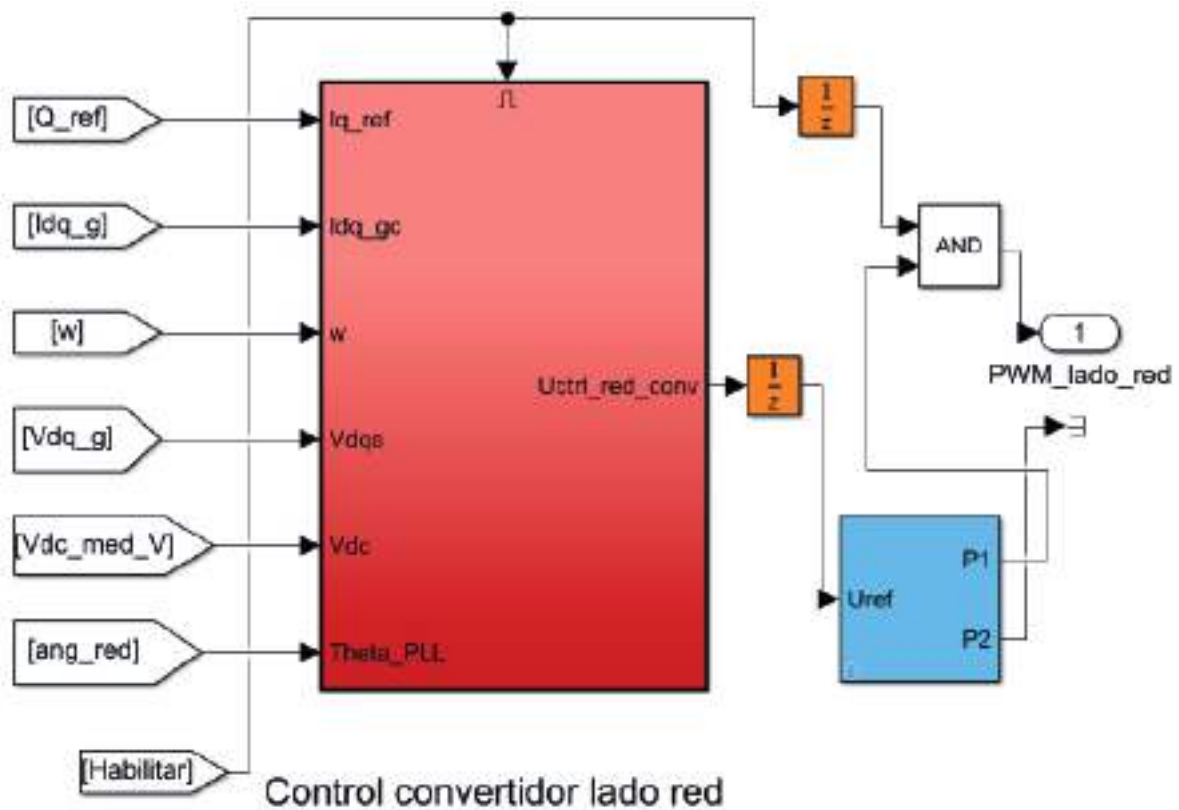


Figura 4.18: Control lado red Simulink. Fuente: [44] [36] [39] [40]

#### 4.4.6. Diseño de convertidor de red

Retomando la ecuación 4.45 y 4.46, la función de transferencia del loop interno del lado red es:

$$H_{OL,r}(s) = G_d(s)F_r(s) = \frac{\frac{1}{R_r}}{(1 + T_a s)(1 + \tau_r s)} \quad (4.47)$$

Para el diseño del controlador exterior y el interior del lado red, la función transferencia de bucle cerrado se aproxima a un primer orden.

$$H_{eq,r}(s) = \frac{i_q}{i_q^*} = \frac{i_d}{i_d^*} = \frac{1}{1 + T_{eq,r} s} \quad (4.48)$$

$$T_{eq,r} = t_{s,10}/2,3 \quad (4.49)$$

donde  $t_{s,10}$  es el tiempo de asentamiento del 10% de la función transferencia interior. El control se obtiene por definir los bucles de retroalimentación y el controlador  $G_c$  como:

$$i_d^* = G_{c,v}(s)(v_{dc}^* - v_{dc}) \quad (4.50)$$

La función de transferencia de bucle abierto exterior del eje "d" del lado red es:

$$H_{OL,r}(s) = G_v(s)H_{eq,r}(s) = \frac{-\frac{3}{4C}}{(1 + T_{eq,r}s)s} \quad (4.51)$$

Asumiendo los siguientes parámetros del generador:

	Parámetros de diseño
Parámetro	
$R_r$	0.36 [ $\Omega$ ]
$f_{PWM}$	2700 [Hz]
$L_r$	5 [mH]

Tabla 4.2: Parámetros de utilidad para el diseño del PID [37]

El diagrama de Bode del lazo interno será:

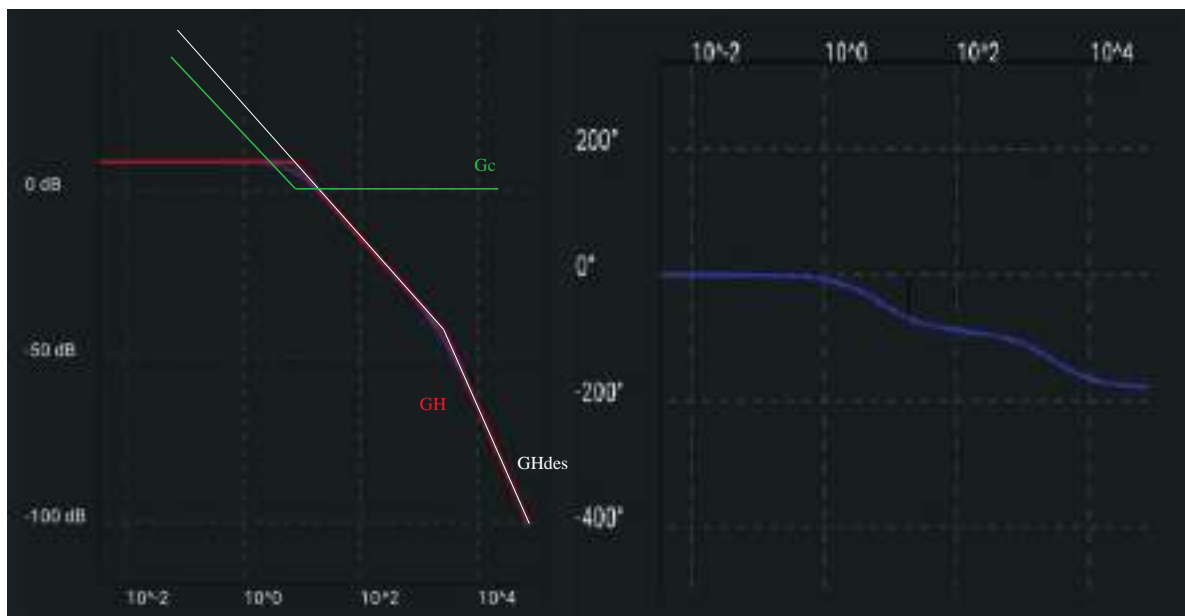


Figura 4.19: Diagrama de bode PI loop interno lado red

El controlador está definido como:

Parámetros de PI	
Parámetro	
$K_i$	5
$K_p$	0.8

Tabla 4.3: Parámetros de diseño del PI [37]

Se observa que se se quiere lograr un error al escalon igual a "0" y alcanzar el ancho de banda mayor posible cuidando el margen de fase. Por ello, en la figura 4.19 se propone un controlador PI aproximado para obtener estos resultados. Utilizando Matlab para un resultado mas exacto se calcula el resultado final del control:

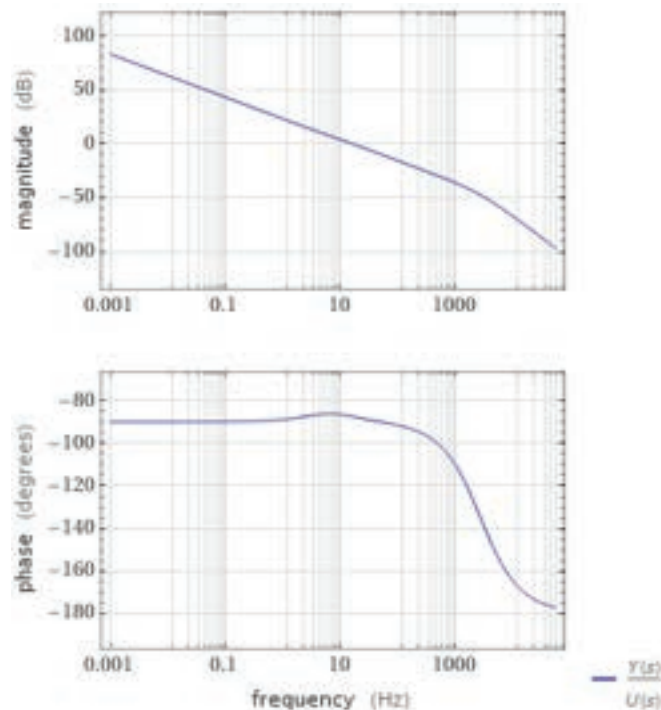


Figura 4.20: Diagrama de bode PI loop interno lado red con controlador aplicado

Y para el diseño de este controlador mediante la bibliografía [37] se deduce que los valores del PI pueden obtenerse como:

$$a, T_i, K_p = \frac{1}{\omega_c T_\alpha}; a^2 T_\alpha; \frac{1}{a T_\alpha K} \quad (4.52)$$

donde "a" es un parámetro de diseño  $\omega_c$  es la frecuencia del lazo de bucle abierto. "a" está en el rango [2,4]. Un valor más alto de a conduce a una mejor amortiguación pero una respuesta más lenta. Todo esto es válido si se considera una función de transferencia de la siguiente forma:

$$H_{OL}(s) = \frac{K}{(1 + T_\alpha s)(1 + T_\beta s)} \quad (4.53)$$

Cumplíndose que  $T_\beta \gg T_\alpha$  y  $T_\beta \gg 1$  puede aplicarse a la función transferencia. Si se asume un  $a = 2$  se obtiene los valores del controlador en función del diagrama de Bode en la figura 4.21:

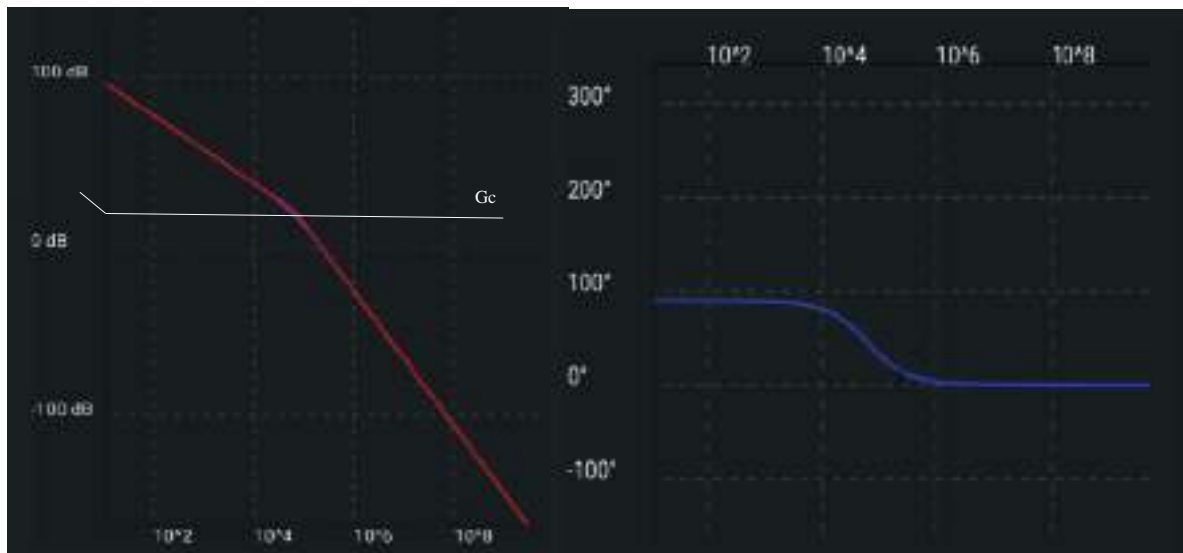


Figura 4.21: Diagrama de bode PI loop interno lado red y controlador aplicado

Al simular se notó que la variación de la tensión del capacitor tardaba en amortiguarse demasiado tiempo por lo que se optó por elevar el parámetro  $k_p$  de 0.1 a 10 y elevando el integrador a 400 para lograr mayor margen de fase. En la siguiente imagen se ve como cambia la regulación de tensión al cambiar el parámetro proporcional.

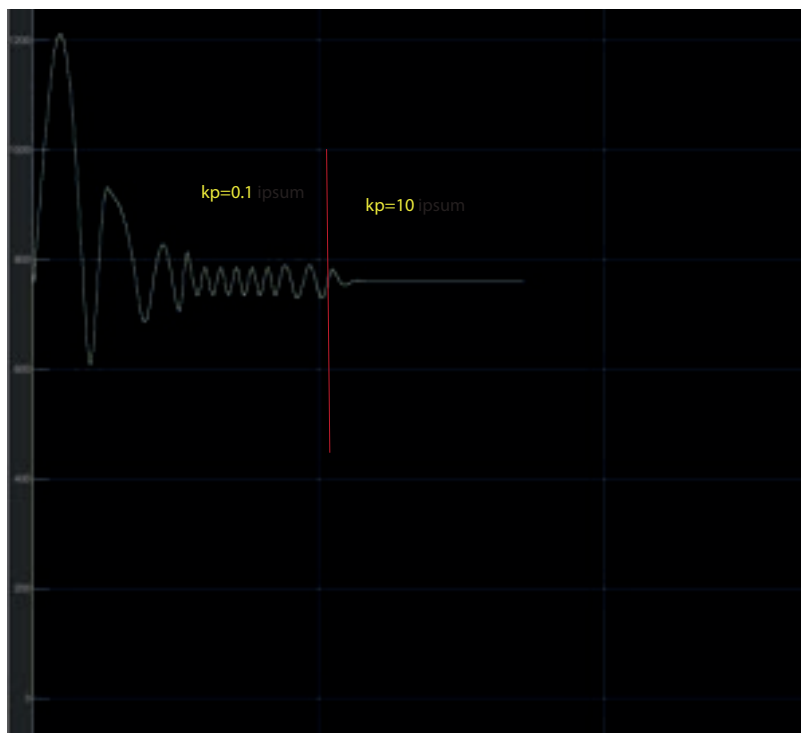


Figura 4.22: Corrección de regulación del voltaje DC por  $K_p$

Se simularon variaciones en los parámetros para obtener una mejor solución hasta llegar a estos valores. El controlador está definido como:

	Parámetros de PI
Parámetro	
$K_i$	400
$K_p$	10

Tabla 4.4: Parámetros de diseño del PI [37]

Luego el diagrama de bode de la función controlada quedará:



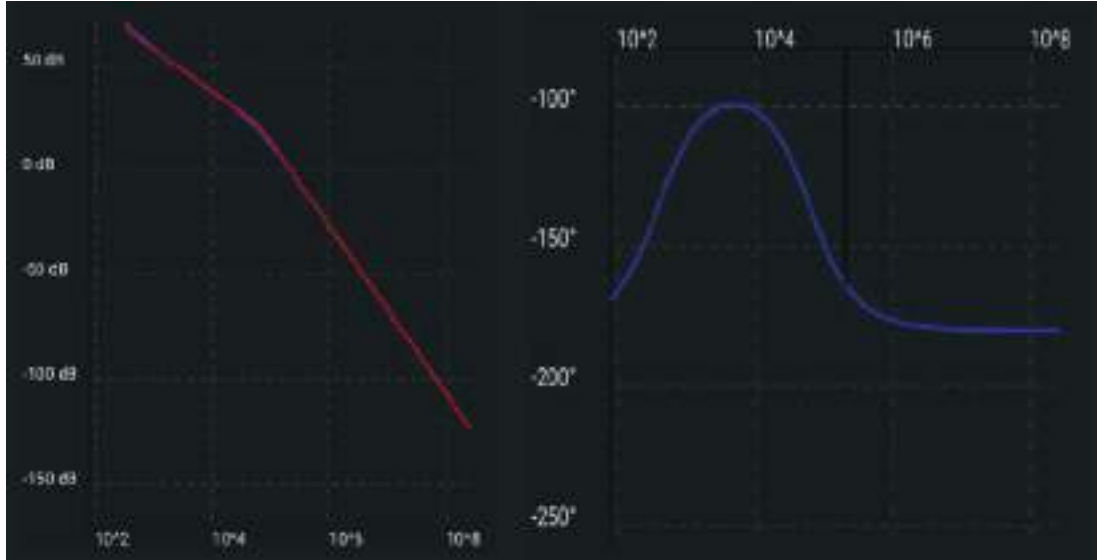


Figura 4.23: Diagrama de bode PI loop interno lado red con controlador aplicado

#### 4.4.7. Diseño de convertidor de lado generador

Si se hace un procedimiento análogo, el control se obtiene definiendo los circuitos de retroalimentación y los controladores  $G_{c,q}(s)$  y  $G_{c,d}(s)$  como,

$$\nu_{stq,ctrl} = G_{c,q}(s)(i_{stq}^* - i_{stq}) + \omega_e L_{md} i_f^* + \omega_e L_d i_{std}^* \quad (4.54)$$

$$\nu_{std,ctrl} = G_{c,d}(s)(i_{std}^* - i_{std}) + \omega_e L_q i_{stq}^* \quad (4.55)$$

Las funciones de transferencia de bucle abierto interno del lado del generador son:

$$H_{OL,q}(s) = G_d(s)F_{stq}(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{(1 + T_a s)(1 + \tau_q s)} \quad (4.56)$$

$$H_{OL,d}(s) = G_d(s)F_{std}(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{(1 + T_a s)(1 + \tau_d s)} \quad (4.57)$$

El control de la corriente de campo se obtiene definiendo el lazo de retroalimentación y controlador  $G_{c,f}(s)$  como sigue,

$$\nu_{f,ctrl} = G_{c,f}(s)(i_f^* - i_f) \quad (4.58)$$

La función de transferencia de bucle abierto de campo es,

$$H_{OL,f}(s) = G_d(s)F_f(s) = \frac{\frac{1}{R_f}}{(1 + T_a s)(1 + \tau_f s)} \quad (4.59)$$

El control es obtenido definiendo el circuito de retroalimentación y el controlador  $G_{c,\omega}(s)$  como,

$$i_{stq}^* = G_{c,\omega}(s)(\omega_m^* - \omega_m) \quad (4.60)$$

La función de transferencia de bucle abierto exterior del eje q del lado del generador es,

$$H_{OL,\omega}(s) = G_\omega(s)H_{eq,q}(s) = \frac{-\frac{3PL_{md}i_f^*}{2J}}{(1 + T_{eq,qs}s)} \quad (4.61)$$

Se asumen los siguientes parámetros útiles del generador y control:

	Parámetros de diseño
Parámetro	
$R_s$	0.6 [ $\Omega$ ]
$f_{PWM}$	1620 [Hz]
$L_r$	5 [mH]

Tabla 4.5: Parámetros de utilidad para el diseño del PID [37]

De acuerdo a las ecuaciones 4.56 y 4.57, se buscará controlar las corrientes  $i_q$  e  $i_d$ , en la siguiente figura 4.24 se muestra la función transferencia GH, la función deseada  $GH_{des}$  y el controlador que se debe colocar para lograrlo:

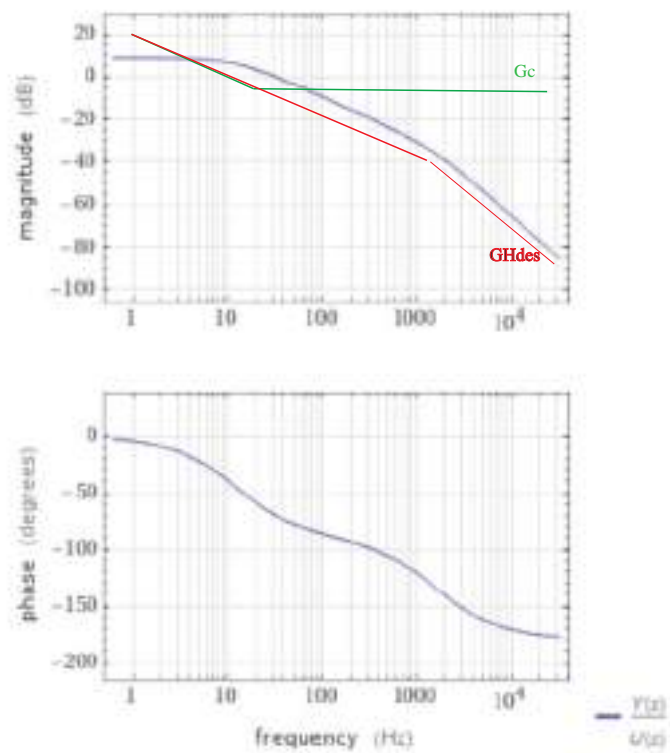


Figura 4.24: Diagrama de Bode de control para convertidor lado generador y controlador PI

Se propuso el siguiente controlador PI luego de variar los parámetros en distintas simulaciones, debido los resultados de las simulaciones:

	Parámetros de PI
Parámetro	
$K_i$	2.7
$K_p$	0.135

Tabla 4.6: Parámetros de diseño del PI [37]

La función transferencia controlada quedará finalmente:

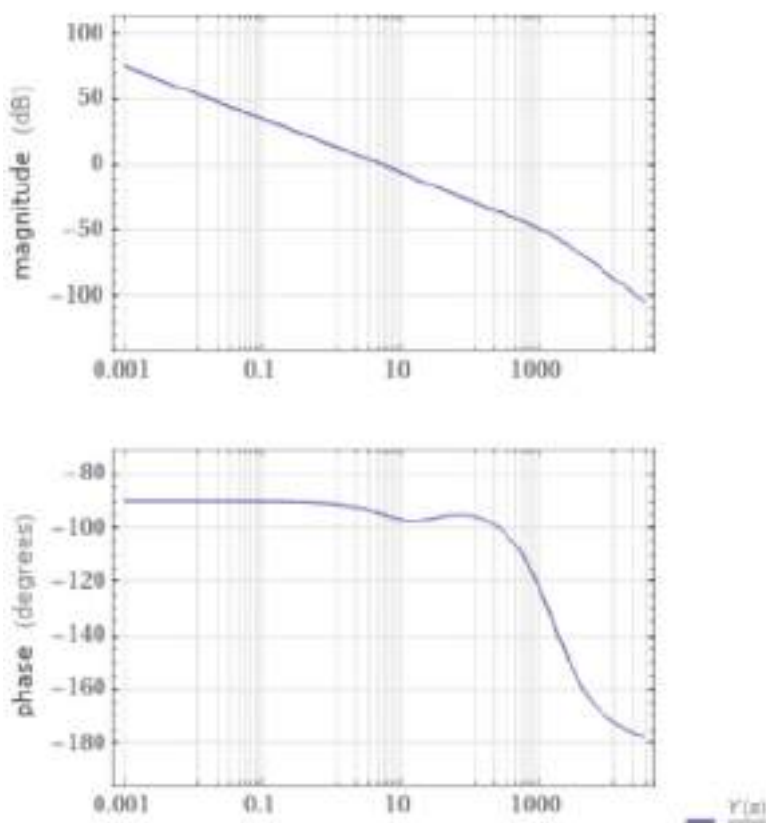


Figura 4.25: Diagrama de Bode de control para convertidor lado generador controlado

## 4.5. Resultados simulación

Una vez definidos los controladores, se procedió a volcarlos al modelo de generador y con los valores de entrada del modelo de la turbina se simuló la respuesta del sistema. Se opta por realizar un paso de tiempo pequeño para obtener resultados fidedignos y mas precisos. Por cuestiones de tiempo de simulación elevados se acotan los tiempos de simulación.

A continuación se presentan los resultados de la simulación para distintas situaciones. Se propondrá entradas de tipo escalón y se variará la entrada para visualizar la respuesta a dichos cambios. Se trabajará en valores por unidad en donde los valores base coinciden con los valores nominales estudiados para la turbina.

	Parámetros de PI
Parámetro	
$S_{base}$	6[kW]
$V_{base}$	380[V]
$f_{base}$	50[Hz]

Tabla 4.7: Valores base de simulación

Al simular comenzando con valores nominales se propone realizar una simulación para entradas escalon para evaluar la estabilidad del sistema y la respuesta. Una vez que alcanza un valor de régimen permanente aproximadamente, se varió la altura a  $1.17[m]$  a  $0.5$  y luego el caudal de  $0.65 [\frac{m^3}{s}]$  a  $0.45 [\frac{m^3}{s}]$ . Una vez que se probó que reaccionaba de forma estable se subió la altura de  $0.5$  a  $1 [m]$  hasta finalmente elevar el caudal de  $0.5$  a  $0.8 [\frac{m^3}{s}]$ . Cabe destacar que estas variaciones bruscas de los valores son para probar la simulación de estabilidad del controlador ya que el régimen de funcionamiento es continuo y estable con muy pequeñas variaciones tanto de altura como de caudal y esto no sería un problema real para este caso.

Si se observa en la figura 4.26 hay un gran pico que alcanza hasta 4 veces el base que se amortigua rápidamente debido a fuerte arranque y puede deberse a que la entrada no es gradual sino que es un escalón, lo que podría verse como una entrada de agua de manera brusca en la compuerta. En cada entrada o variación tiene una pequeña fluctuación hasta que se estabiliza y esta respuesta puede modificarse mediante los parámetros de los controladores PI en los que se prefirió velocidad de respuesta elevada. En cuanto al torque electromecánico a la salida del generador la respuesta es gradual y al llegar a la velocidad nominal del generador tiende a estancarse por encima del valor de la unidad.

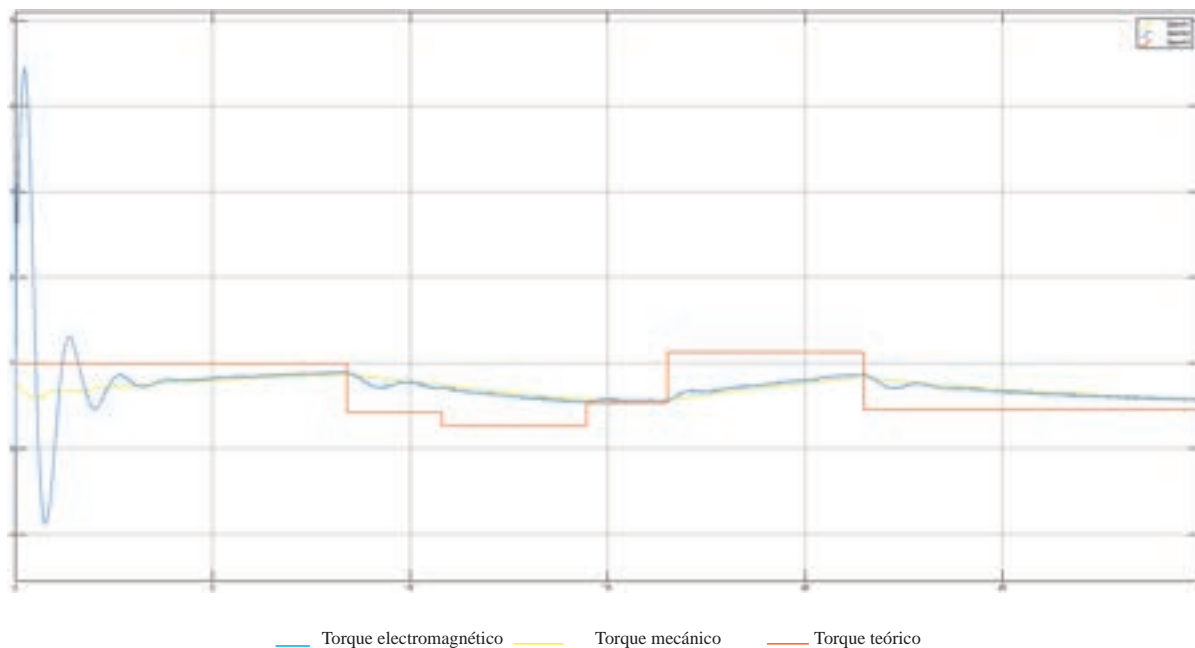


Figura 4.26: Simulación torque teórico[pu] (naranja), torque mecánico [pu] (azul) y torque electromecánico [pu] (amarillo)

Uno de los requerimientos para poder transmitir toda la energía generada hacia la red es que la tensión continua se mantenga constante y si se observa la figura 4.27 luego de un pequeño pico transitorio la tensión logra establecerse en el valor seteado ( $\approx 2.U_{nom}$ ). Se podrían insertar reactancias de inserción para reducir estos picos a valores menores para extender la vida del capacitor.

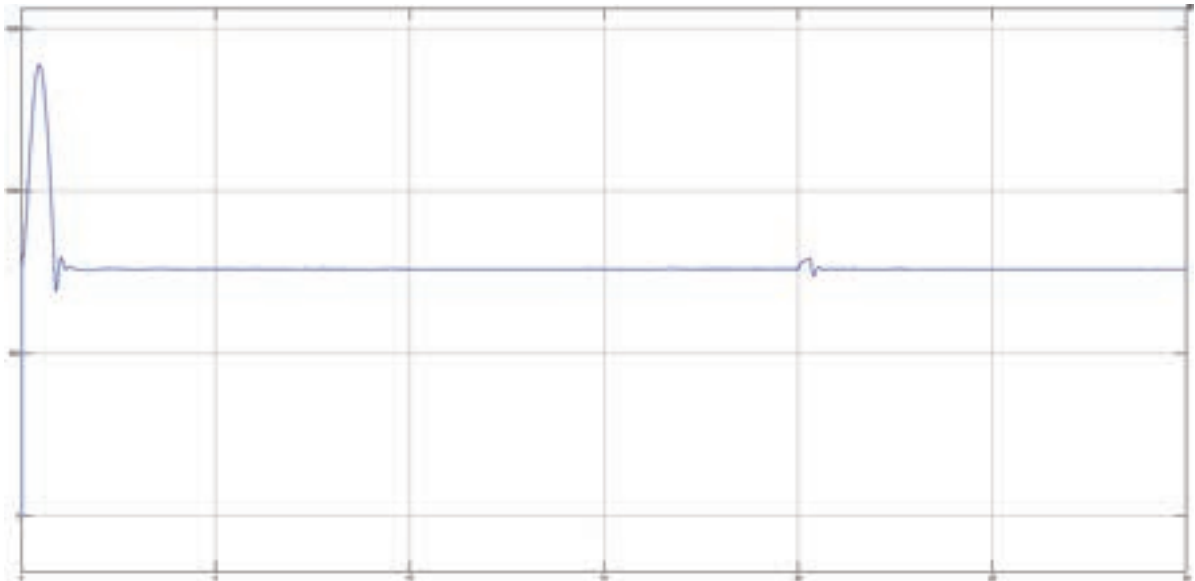


Figura 4.27: Simulación voltaje DC capacitor

Finalmente la potencia generada se puede ver en la figura 4.28 donde hay un transitorio que tiende a crecer, bajar y luego establecerse aproximadamente en 5 segundos. Se observa que sigue los valores de los escalones casi sin transitorios luego de este período. Otra condición para la generación es que la potencia reactiva sea cercana a 0 lo cual puede verse en la curva violeta la cual tiene pocas o nulas fluctuaciones.

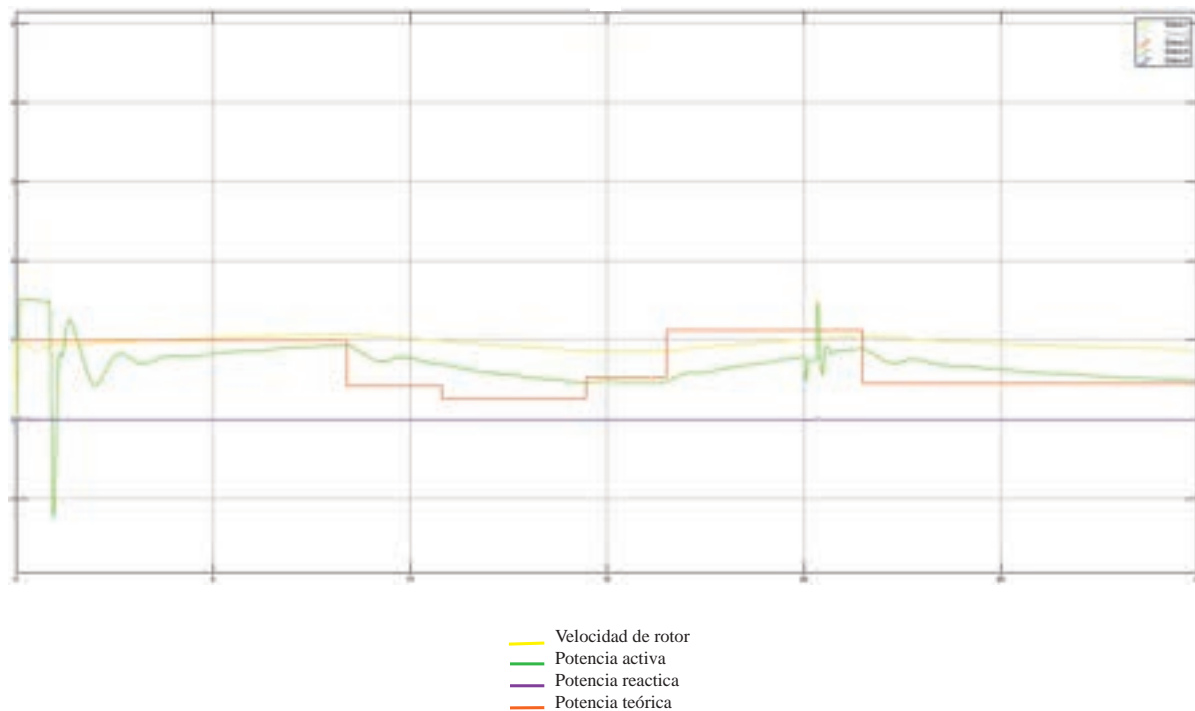


Figura 4.28: Simulación velocidad de rotor ( $w_r$ , amarillo)[pu], torque teórico [pu] (naranja), potencia activa generada ( $P$ , verde)[pu] y potencia reactiva ( $Q$ , violeta) [pu]

La tensión de acoplamiento a la salida del convertidor se mantiene en el valor base 380 [V] expresados en valor [pu] en la figura 4.29:



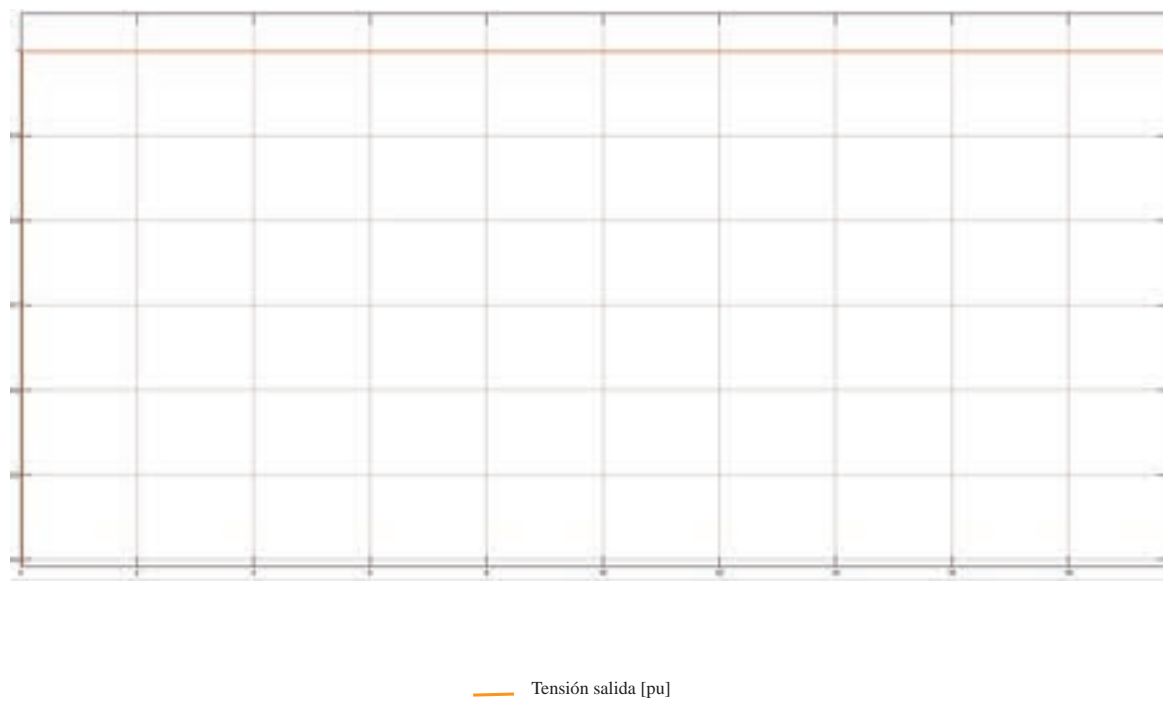


Figura 4.29: Simulación de tensión de salida [pu]

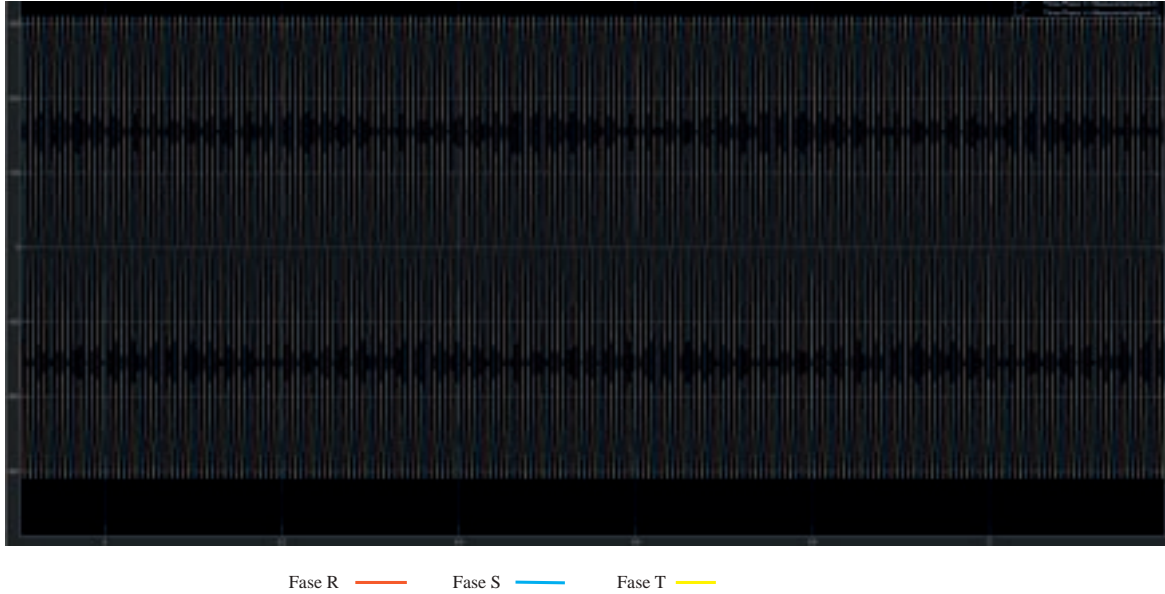


Figura 4.30: Simulación de tensión en detalle por fase [V]

Y la corriente puede observarse en la figura 4.31 donde se ven los cambios debido a las variaciones del torque y por lo tanto de la potencia generada.

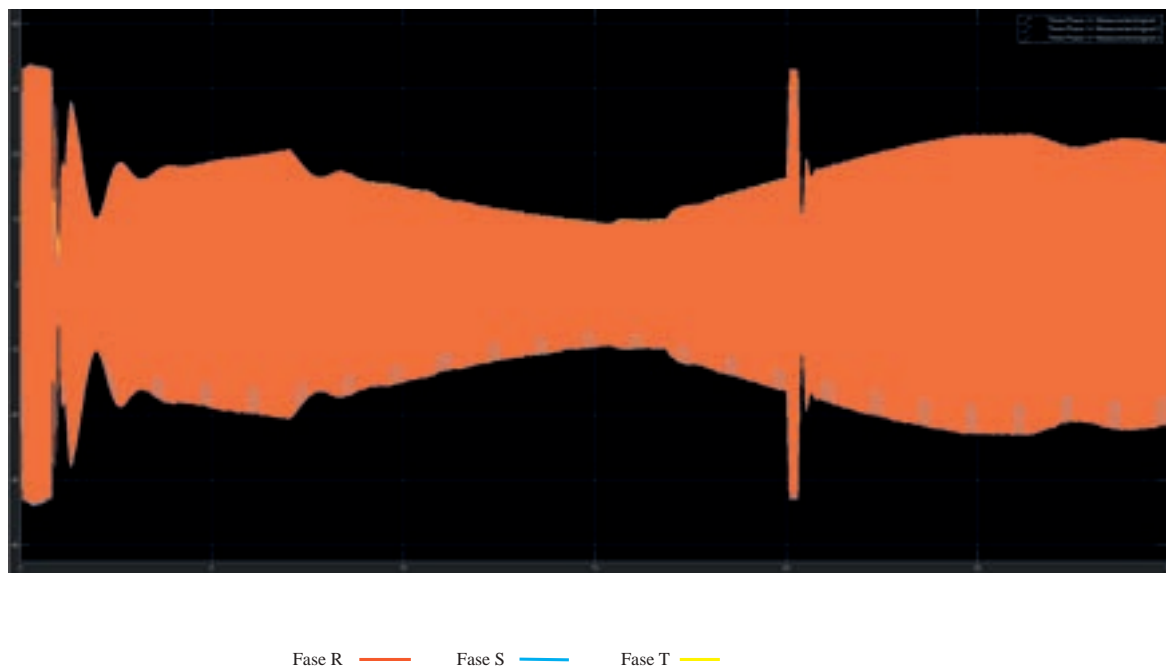


Figura 4.31: Simulación de corriente en detalle por fase [A]

El modelo de MatLab utilizado para la simulación se presenta en detalle en el apéndice 4. Este modelo y controlador podría realizarse realmente lo cual excede a este trabajo e incluso se invita a que se mejore en un futuro proyecto. Mediante la simulación de este modelo se logró evaluar la respuesta del sistema si se aplicara un controlador con estas características pero comercialmente existen controladores regenerativos que utilizan este mismo método (PWM) u otros para devolver energía hacia la red al igual que para almacenar esa energía y utilizarla cuando sea necesario por ejemplo para cargas aisladas.

Estos convertidores funcionan debido a los 4 cuadrantes de operación. La definición y numeración de los cuadrantes operativos se muestran en la 4.32. La energía se puede tomar de la red y entregar a la carga, siendo la tensión y la corriente del convertidor del mismo sentido. En el caso de que el voltaje y la corriente sean contrarias, la energía vuelve de la carga, siendo "recibida" por el convertidor que la sensa y convierte en modo generador.

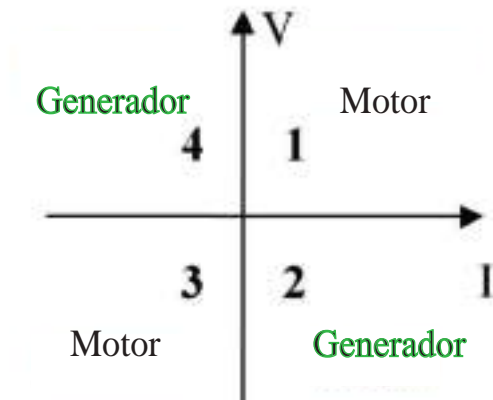


Figura 4.32: Régimen de operación de 4 cuadrantes

En los cuadrantes de recepción (cuadrantes dos y cuatro), el convertidor tiene que extraer energía de la carga, ya sea disipándola, almacenándola o devolviéndola a la red.

### Almacenamiento local

Si se desea almacenar para alimentar una carga aislada, esta función se suele realizar mediante condensadores, que se encargan de recoger la energía de carga. Los condensadores pueden ser una parte natural de la topología elegida (topología CC-CC de puente completo), y dimensionada para acondicionar el voltaje requerido de almacenamiento. Incluso algunos diseños ya incluyen el almacenamiento local de energía con supercapacitores.

### Devolución a la red

Como se ha simulado anteriormente, existen convertidores B2B y regenerativos que utilizan la energía rotante para hacer circular y controlar una corriente en sentido contrario para trabajar en el cuadrante regenerativo. Este es el caso que se va a aplicar al proyecto por lo que se ha seleccionado un conjunto variador VFD C2000 (VFD 075 C 43 A) que es compatible con un convertidor regenerativo AFE2000 marca Delta (AFE 075

A 43 A) junto con el reactor de línea (AF RC 0.75 A 4). Dichos aparatos se encuentran detallados en el apéndice 3.



Figura 4.33: Equipos seleccionados para generación

Este tipo de controlador se encarga de la provisión de intercambio de potencia bidireccional entre corriente alterna y corriente directa, y la regeneración de energía reutilizable al suministro eléctrico para reducir el costo de energía. Este driver usa modulación PWM para reducir significativamente picos distintivos de corriente y formar una corriente de onda sinusoidal perfecta. El factor de energía se corrige en hasta "1", el ratio entre la capacidad de carga y la capacidad de potencia es 1:1. Además, el convertidor elimina el armónico de alto orden, proporciona una corriente armónica muy baja  $THD < 5\%$  y mejora el factor de energía. También ofrece calidad de energía estable que no se ve afectada por las fluctuaciones en el suministro eléctrico lo cual para este proyecto presenta una gran ventaja debido a que se ubica en uno de los últimos ramales de red eléctrica de la zona donde los huecos de tensión son un problema frecuente.

Dentro de las aplicaciones de este convertidor, aparte de aplicaciones de retroalimentación de largo plazo (sistemas de energía eólica y sistemas de energía hidráulica) se utiliza para:

- Aplicaciones de carga de gran inercia: máquinas de mechar, centrífugas espirales horizontales y perforadoras.
  
- Aplicaciones de carga de 4 cuadrantes: grúas, elevadores de carga, elevadores de pasajeros, máquinas de producción de petróleo.
  
- Aplicaciones de frenado rápido: herramientas de máquinas, ejes de alta velocidad, máquinas para hacer bolsas.
  
- Aplicaciones de suministro de CC: sistemas de logística y almacenamiento, sistemas de energía eólica, sistemas de iluminación LED.
  
  
- Puentes grúas y elevadores

## 4.6. Protecciones de sistema

Es necesario garantizar la seguridad de funcionamiento y maniobra del conjunto generador por lo que se deberá elegir las protecciones para ello. Deberá cumplir con la normativa eléctrica y de seguridad vigente aplicable, y a su vez deberá cumplir con los requerimientos mínimos indicados aunque específicamente para la generación distribuida hidráulica no hay un esquema regulatorio definido en su totalidad.

En el esquema a continuación se representa el diagrama unifilar eléctrico de referencia del sistema, indicando las conexiones y elementos mínimos de protección requeridos para la conexión del equipo.

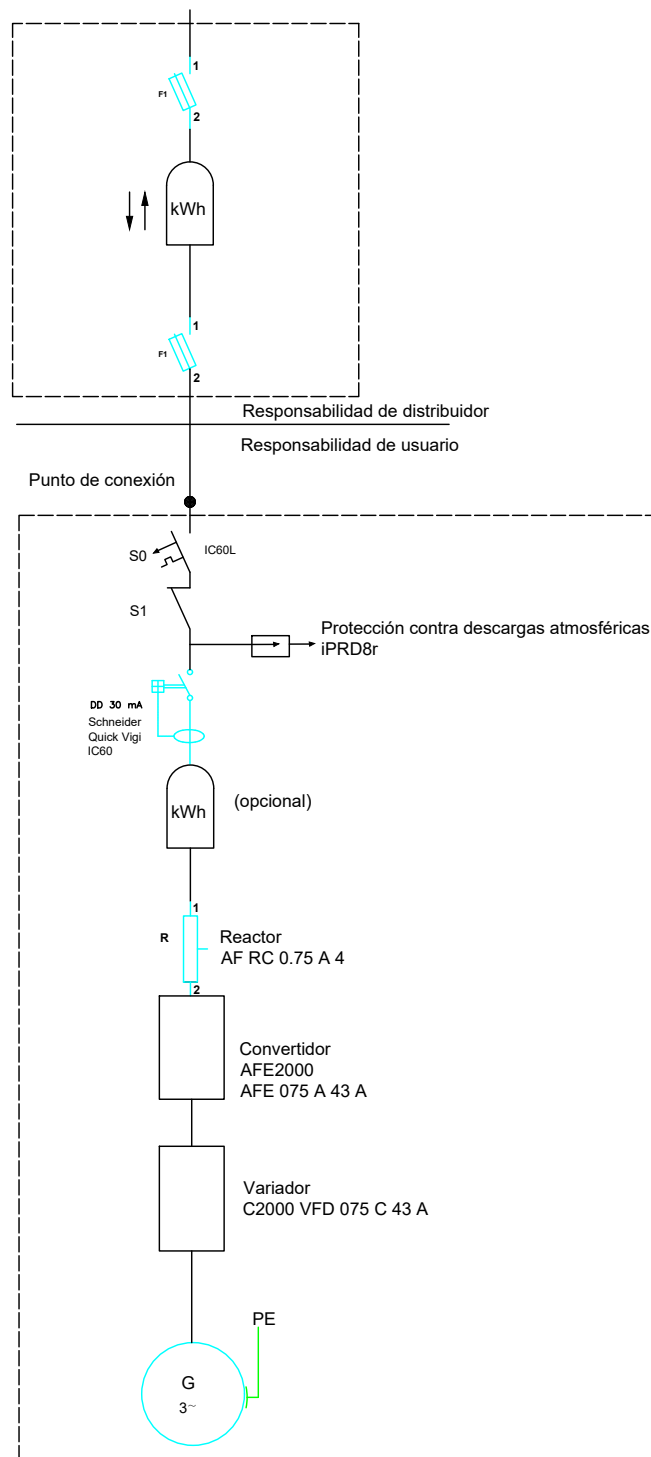


Figura 4.34: Esquema unifilar del sistema generador

Este tablero de protecciones deberá estar ubicado cercano al punto de conexión y contar con un dispositivo de protección contra cortocircuitos y sobrecargas. Para la protección termomagnética se selecciona un interruptor termomagnético schneider IC60L (20A) A9F93320, curva B. Se verifica por la simulación que la corriente (figura 4.35) alcanza un transitorio de 2.In alrededor de 2 segundos y con esta curva se verifica que no provocará el disparo de la protección.

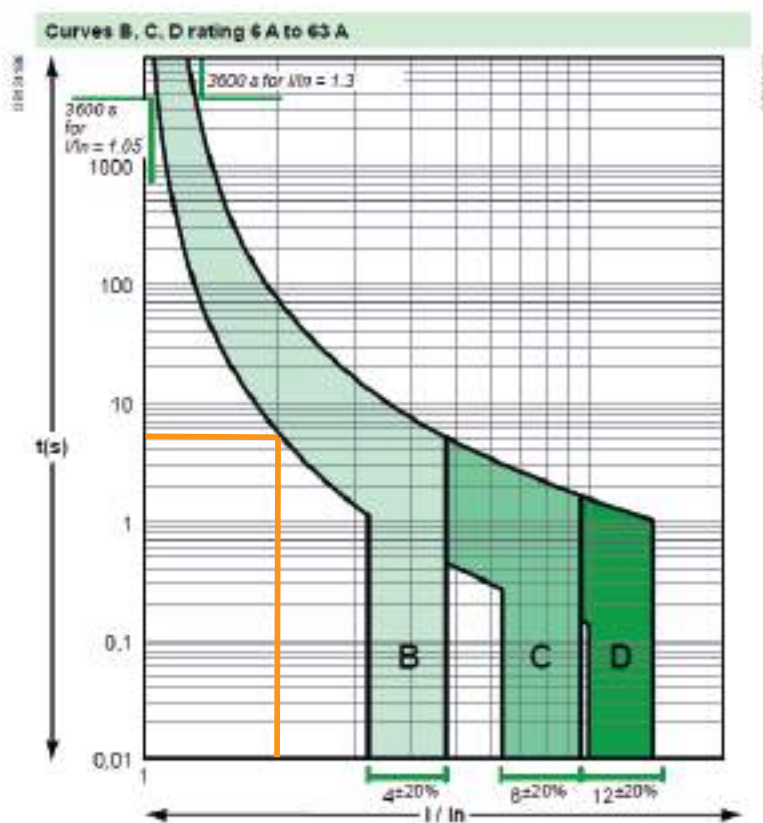


Figura 4.35: Curva de llave termomagnética seleccionada

Para la protección contra fugas a tierra se selecciona un DD Schneider Quick Vigi IC60 A9Q31425, cuya sensibilidad cumple los 30 mA.

Para la descarga de sobretensiones debe tenerse en cuenta la región donde está instalado el proyecto. Para zonas rurales y en zona con un riesgo especial (regiones montañosas, ambientes húmedos, lagos, etc) corresponde un riesgo nivel 3. Se selecciona un descargador de sobretensión transitoria iPRD8r (A9L16679). Finalmente para el cable se selecciona un cable Sintenax Valio de 10  $mm^2$  para cubrir eventuales picos de potencia sin sufrir ningún tipo de sobrecarga.

Podrá ser necesario en casos especiales una parada de emergencia que pueda ser de facil acceso para una persona que esté trabajando en el lugar. Se utiliza una fuente de continua para alimentar un relé de seguridad de doble lazo. Este doble lazo garantiza que



ante una avería en cualquiera de los dos contactos el otro cortará y parará la alimentación. Mientras la parada no esté pulsada el contacto de salida energizará la bobina del contactor cerrando el circuito. Ante una parada se deberá presionar el reset para volver a poner en funcionamiento del sistema. En este caso, el contactor seleccionado es un LC1d40A. El diagrama del relé es el siguiente:

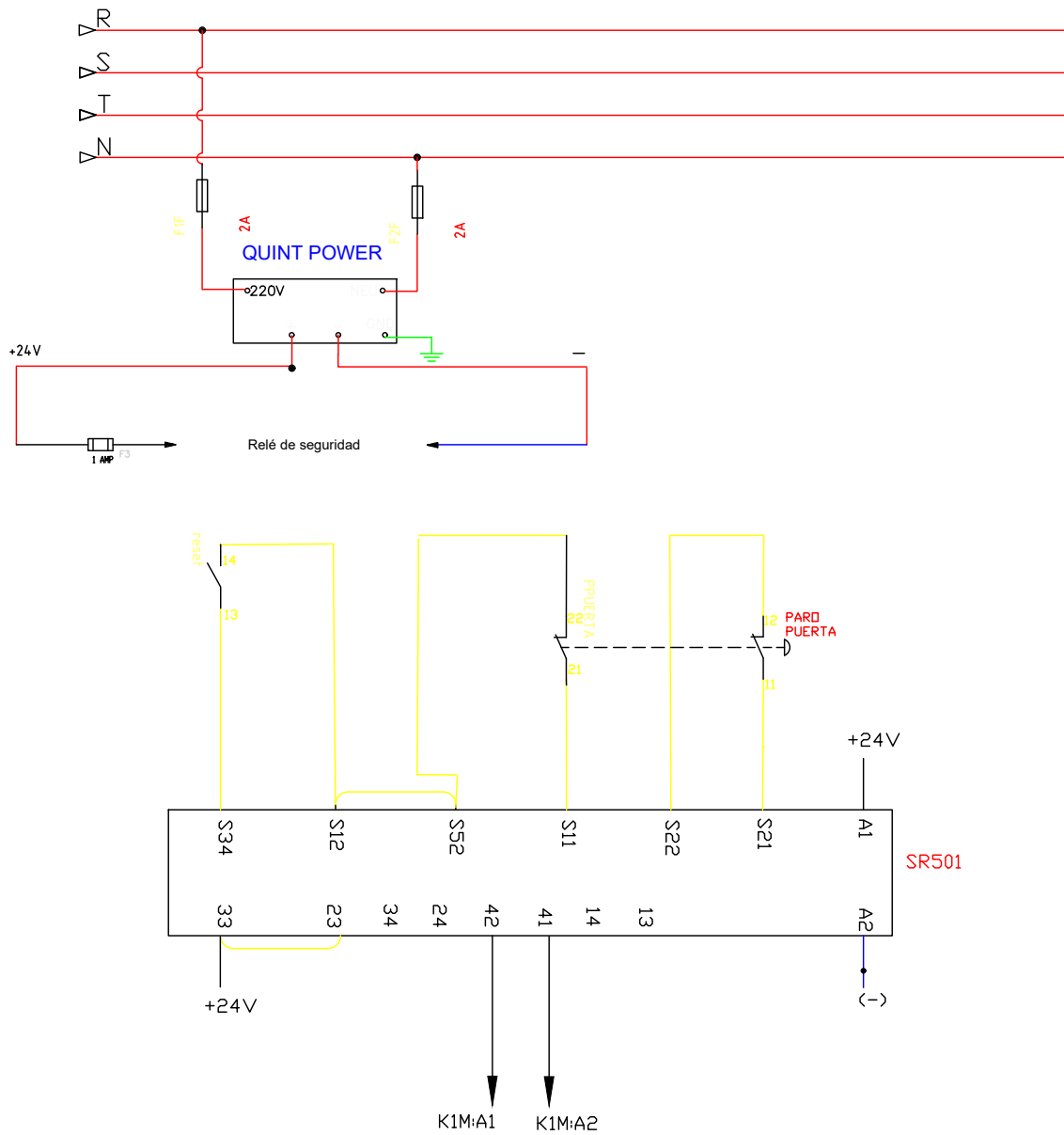


Figura 4.36: Esquema de relé de seguridad y parada de emergencia

### 4.6.1. Condiciones de puesta a tierra

La puesta a tierra de los Equipos de Generación Distribuida debe ser realizada de tal manera que no se alteren las condiciones de puesta a tierra de la red de distribución, asegurando que no se le transfieran perturbaciones a esta última. Las masas deben estar conectadas a una tierra independiente del neutro y de la tierra de la red de distribución.

Asimismo, deben cumplir con lo indicado en los reglamentos de seguridad y calidad vigentes que sean de aplicación. Se utiliza el mismo criterio de selección para este cable que en instalaciones domiciliarias cumpliendo lo siguiente:

Sección nominal de los cables de línea (fase) de la instalación "S" [ $mm^2$ ]	Sección nominal del correspondiente conductor de protección " $S_{PE}$ " [ $mm^2$ ] y del cable de puesta a tierra " $S_{PAT}$ " [ $mm^2$ ]
$S \leq 16$	S
$16 < S$	16
$S > 35$	$\frac{S}{2}$

Tabla 4.8: Sección de conductor de tierra

Para la puesta a tierra se selecciona una jabalina de 35 [ $mm^2$ ] de 1,5 [m], corresponde a un diámetro de 6.77 [mm].

## 4.7. Plan de mantenimiento preventivo eléctrico

Las condiciones generales de seguridad de las personas trabajando sobre o en proximidad de la unidad generadora deberán cumplir la normativa nacional referida a la seguridad.

- Se deberá colocar señales de advertencia en lugares visibles para toda persona que pueda acceder a partes activas de la instalación eléctrica interior, indicando la necesidad de aislar de las fuentes de energía eléctrica provenientes tanto de la Red de como de la generación propia, antes de trabajar sobre la misma. Asegurar de realizar LOTO (Log-Out/Tag-Out) antes de realizar cualquier trabajo dentro de la instalación.
- Se instalarán señales de advertencia y se controlará el estado de las mismas en todos los puestos, tableros y elementos que corresponda.



Figura 4.37: Señalización del tablero

Sin energía:

- Verificar que los cableados de potencia y de control están de acuerdo a los planos y en estado apropiado
- Inspección de la puesta a tierra y medición de la resistencia de puesta a tierra.
- Medición y verificación de no inyección de homopolares.
- Verificación de interruptor general y diferenciales.
- Verificar que los ajustes y programación de los equipos de protección y sincronización (si corresponde)
- limpieza de disipadores (de variador y convertidor)
- Ajuste de terminales

Con energía:

- Ensayo de reconexión del equipo

- Medición de calidad de energía (armónicos, THD, huecos de tensión o cortes, factor de potencia, flicker de fases, potencias activas y reactivas, etc). Elaboración de informes y planillas

Se recomienda repetir los ensayos realizados para la puesta en servicio en un término no mayor a 2 (dos) años, manteniendo registros de los mismos, a efectos de garantizar el adecuado funcionamiento de la unidad generadora.

## 4.8. Conclusión

Luego de buscar distintas alternativas para obtener un aprovechamiento de la energía se propuso un sistema de control y se simuló mediante un modelo en MatLAB y comparar con los valores esperados. En este modelo se seteo los valores de los controladores para simular las condiciones de trabajo y se eligieron los materiales necesarios para realizar la instalación eléctrica.

Se elaboró un plan de mantenimiento eléctrico que ayudará a incrementar la vida útil de los elementos ya que resultan muy costosos como en el caso de los convertidores de potencia. Al igual que un plan de mantenimiento, se tuvo en cuenta que al ser una zona transitada hay que realizar un sistema de seguridad que involucra cuerdas de emergencia en caso que se sobrepase un límite de seguridad que provocará una parada instantánea.



# Capítulo 5

## Esfuerzos mecánicos

### 5.1. Introducción

Luego de un análisis de la geometría del runner, se definieron los parámetros básicos para el diseño. En este capítulo se realizaron los cálculos y selección de los materiales de los elementos, evaluando las solicitaciones mecánicas que deberá soportar.

### 5.2. Material de construcción

Es necesario elegir el material con el cual se podrá fabricar la turbina. Los principales requerimientos buscados son: coste bajo, menor peso posible y por supuesto sus propiedades mecánicas.

Hay una tendencia tanto en hidráulica como en generación eólica a escala de servicios públicos en fabricarse utilizando una forma u otra de compuestos poliméricos reforzados. Generalmente, se trata de vidrio E, e-poxy líquido que se cura en moldes y conforman la superficie aerodinámica de la hoja. Sin embargo, también se han puesto en servicio un gran número de palas utilizando otras resinas líquidas, como poliéster. Pero, de hecho, muchas palas de los fabricantes de equipos originales más importantes también han incorporado fibra de carbono para las tapas de los largueros que forman la “columna vertebral” (elemento de flexión) de la cuchilla.

Todo tipo de acero o material metálico quedará descartado por el coste que implica lo que lo haría desde un principio inviable económicamente, además de un elevado peso lo que implicaría aumentar la robustez de todo el proyecto. Sin embargo, se realizará la comparación con este material.

### 5.3. Simulación fluidodinámica

En primer lugar se realizará la simulación de la turbina en un modelo pseudo-transitorio a través de un programa de simulación CFD (Software de elementos finitos), el objetivo es lograr obtener una matriz de los esfuerzos ejercidos sobre la estructura y poder aplicarlo a distintos materiales para su evaluación.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) (en inglés Computational fluid dynamics) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza análisis numérico y estructuras de datos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos. Las computadoras se usan para realizar los cálculos necesarios para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por condiciones de un entorno.

En temas de software más utilizados en una simulación CFD, el mercado es dominado por el Ansys Fluent. Se utilizará este programa para simular las condiciones del proyecto. En el "Apendice 2" se detallan en profundidad los pasos seguidos para la obtención del material idóneo.

#### Fibra de carbono

La fibra de carbono es el desarrollo más reciente en el campo de los materiales compuestos siguiendo la idea de que uniendo fibras sintéticas con varias resinas, se pueden lograr materiales de baja densidad, muy resistentes y duraderos. Su resistencia es casi 3 veces superior a la del acero, y su densidad es 4,5 veces menor. El proceso de moldeado se realiza llevando a altas temperaturas que darán origen a distintos tipos de fibras que se impregnan con resinas en moldes, una desventaja es su alto precio.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1750	$kg/m^3$
Alargamiento a la Rotura	0,4 - 2	%
Resistencia a la tracción	3000-4000	MPa
Modulo de Young	230-290-390	GPa
Modulo de corte	9	GPa
Densidad	1700-1800	$kg/m^3$
Precio aprox	120	$u\$/kg$

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas de fibra de carbono [43]

#### Resina epoxy

Las resinas epoxy para formado se emplean principalmente en compuestos y adhesivos necesarios para producir la pieza, utilizado bastamente para generación de energía eólica y otros elementos estructurales.



La fabricación de palas del rotor se puede realizar utilizando dos diferentes tecnologías: infusión al vacío y el llamado "preimpregnado". El uso de infusión al vacío es más frecuente. La resina epoxi líquida se mezcla con el endurecedor y es aspirado hacia el molde a través de una bomba de vacío impregnando las fibras. Después de calentar y curar se obtienen las mitades que son unidas mediante un adhesivo epoxy.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1160	$kg/m^3$
Módulo de Young	3780	MPa
Resistencia a la tracción	50	MPa
Resistencia a la flexión	125	MPa
Modulo de flexión	3400	MPa
Tensión de fluencia	54,6	MPa
Modulo de corte	1.4	GPa
Precio aprox	45	$u\$/kg$

Tabla 5.2: Propiedades mecánicas de resina epoxy [43]

### Resina de polyester

La resina de poliéster es una resina de polímero insaturado termoendurecible, el cual se forma de la reacción entre ácidos orgánicos y alcoholes polihídricos. Su forma de presentación es en estado líquido viscoso de color ámbar por lo que, después de su aplicación, es necesaria la utilización de un catalizador que permita la solidificación de la resina. Esto se consigue a través del proceso de curado o endurecimiento.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1200	$kg/m^3$
Módulo de Young	3000	MPa
Resistencia a la tracción	50 -75	MPa
Resistencia a la flexión	80 - 150	MPa
Modulo de flexión	3500 - 4500	MPa
Modulo de corte	1.1398	GPa
Precio aprox	10	$u\$/kg$

Tabla 5.3: Propiedades mecánicas de resina polyester [43]

### Compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven

La resina epoxi es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador. Los compuestos de fibras y epoxi se caracterizan por tener propiedades mecánicas superiores a las de poliéster, aunque el coste es superior también.

Al igual que en el caso anterior, la fibra de vidrio con resina epoxi presenta muy buenas propiedades anticorrosivas, pudiendo trabajar en ambientes húmedos. El peso de este material sigue siendo inferior que el del acero y es fácilmente moldeable.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1857,0	$kg/m^3$
Módulo de Young	15 - 26.4	GPa
Resistencia a la tracción	138 -241	MPa
Alargamiento a la fluencia	0.85 -0.95	%
Modulo de corte	11	GPa
Tensión de fluencia	441	MPa
Precio aprox	22.3 - 25	$u\$/kg$

Tabla 5.4: Propiedades mecánicas de compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven [43]

### Poliamida Nylon 6

El nylon es un material parcialmente cristalino que por su proceso de fabricación muestra gran tenacidad y resistencia, características importantes si se usa bajo carga o impacto o temperaturas moderadas. Posee una elevada resistencia al choque y a la fatiga, buena resistencia al desgaste y también a las bajas temperaturas. Es muy apreciable la resistencia a la rotura y a la flexión. Su elasticidad permite la absorción de las vibraciones o impactos.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1140,0	$kg/m^3$
Módulo de Young	1.111	GPa
Módulo de elasticidad a la tracción	3200	MPa
Resistencia a la tracción	70	MPa
Alargamiento a la fluencia	0.7	%
Modulo de corte	0.411	GPa
Tensión de fluencia	43.13	MPa
Precio aprox	13	$u\$/kg$

Tabla 5.5: Propiedades mecánicas de Nylon 6 [43]

### Polietileno de alta densidad HDPE

Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetidas de etileno. Suele producirse por extrusión, moldeo, inyección-soplado y extrusión-soplado.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	958.5	$kg/m^3$
Módulo de Young	1.08	GPa
Módulo de elasticidad a la tracción	850	MPa
Resistencia a la tracción	28	MPa
Alargamiento a la rotura	300	%
Modulo de corte	0.380	GPa
Tensión de fluencia	28.39	MPa
Precio aprox	8-10	$u\$/kg$

Tabla 5.6: Propiedades mecánicas de HDPE [43]

### Epoxy / fibra de carbono woven

Los plásticos impregnados de otros materiales fibrosos también pueden formar materiales compuestos con propiedades interesantes. Este tipo de fibras se emplean en muchas aplicaciones donde se necesiten gran resistencia y peso ligero, como por ejemplo en la industria aeronáutica. No obstante, también destaca por su precio más elevado. Suele utilizarse con resina epoxi que presenta propiedades mecánicas más elevadas que la de poliéster.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1518	$kg/m^3$
Módulo de Young	10 - 140	GPa
Modulo de corte	2.7 -3.3	GPa
Resistencia a la flexión	500	MPa
Modulo de flexión	30.65	GPa
Precio aprox	34.3 - 38.1	$u\$/kg$

Tabla 5.7: Propiedades mecánicas de Epoxy /fibra de carbono woven [43]

### Epoxy E-glass Wet

Es una variante del Epoxy E-glass woven pero sin preimpregnado (tejido de refuerzo que ha sido impregnada con una resina o matriz, generalmente termoestable, con bastante anterioridad al momento de su uso).

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	1850	$kg/m^3$
Módulo de Young	9 - 35	GPa
Modulo de corte	3.5 - 4.7	GPa
Precio aprox	14 - 25	$u\$/kg$

Tabla 5.8: Propiedades mecánicas de Epoxy /fibra de vidrio wet [43]

### Acero estructural

Las propiedades del acero estructural permiten que este material sea utilizado para distintos fines en construcción. Su composición de hierro, carbono y distintas aleaciones que incluyen silicio, fósforo, azufre y oxígeno, permiten hacer de este material uno de los más resistentes para construcción. No es el material mas adecuado, pero se analizará las sollicitaciones para comparación.

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	7850	$kg/m^3$
Módulo de Young	200	GPa
Modulo de corte	76.9	GPa
Coef de exp térmica	$1,2^{-5}$	1/C
Tensión de fluencia	250	MPa
Tensión a la rotura	460	MPa
Precio aprox	8	$u\$/kg$

Tabla 5.9: Propiedades mecánicas de Acero estructural [43]

#### 5.3.1. Elección de material

A pesar que existen y se siguen trabajando en muchos materiales compuestos hoy en día, se analizan las opciones estudiadas anteriormente para acotar el abanico de posibilidad y que se cuenta con las propiedades en la librería del software de simulación. No se descarta que pueda haber un material superior o competitivo en el mercado que puedan ser útiles para este proyecto.

Para la elección del material mas adecuado se realizó un calculo por peso ponderado calificando 3 propiedades para cada material con un número del 1 al 4. Las propiedades analizadas son: coste, peso y propiedades mecánicas. Tras esto, se realiza la relación entre las características analizadas, otorgando diferentes pesos según su importancia. Se ha concretado que la medida más importante es el coste, ya que de él depende la rentabilidad de la microturbina. A esta propiedad, le sigue de cerca el peso, debido a que es uno de los

principales objetivos para que este tipo de tecnología pueda ser llevado a las aplicaciones descritas.

Una vez establecidas las relaciones se van a cuantificar. Para ello se multiplicó todos los pesos de cada propiedad y se elevó a la inversa del número de propiedades. Este valor por propiedad sobre el total dará el peso ponderado sobre el total.

Se eligió estas variables debido a que el peso de los módulos que conforman el tornillo debe ser el mínimo posible para poder conseguir que tanto el transporte como la instalación sean sencillas. El coste por la rentabilidad del sistema. Por último a pesar de que todos los materiales tienen buenos valores para resistir en una aplicación como es la microturbina hidráulica, es preferible tener valores altos para poder asegurar una mayor fiabilidad.

Los resultados indicaron que sería conveniente realizar con HDPE, Nylon 6 o resina de polyester. Si se observa los resultados de la simulación fluidodinámica se puede observar que las tensiones en la resina de polyester son un orden inferior que los otros dos materiales, sin una diferencia grande de dinero. Se utiliza para el runner resina de polyester ya que comercialmente es mas difundido el moldeo con este tipo de material.

### 5.3.2. proceso de fabricación

Para el caso del tornillo, se fabricará mediante técnica de moldeo y con modulos por un método de pieza partida y uniones con la aleta mediante adhesivos que son de alta difusión comercial. La resina de poliéster suele utilizarse en espacios industriales por sus múltiples propiedades ventajosas. De ese modo, incluso la industria marina lo utiliza en la construcción de barcos.

Presenta resistencia a los rayos ultravioleta y al agua. Son termoestables, lo que significa que son muy maleables. Sin embargo, esto sucede una vez. Al calentarse, se endurecen de tal forma que permanecen inalterables.

## 5.4. Cálculo de las reacciones y los rodamientos

Para calcular los soportes (rodamientos) es necesario analizar los esfuerzos involucrados. La hélice estará atravesada por un eje de acero que sobresale en ambos extremos y estará unido al tornillo por medio de bridas. Debe tenerse en cuenta el peso propio de la hélice y el tubo al que está ligado. El volumen obtenido por el software de diseño es de  $0.295544 [m^3]$ . Con este valor es posible sacar un estimativo del peso de la turbina a lo largo del eje. A este valor debe sumársele el peso del eje que se presume de diámetro exterior de  $150 [mm]$  de acero al carbono SAE 1020 y diámetro interior de  $106 [mm]$  ya que es de facil acceso en el mercado tanto en tuberías como bridas [45]. Por lo tanto:

$$W_t = V_{\text{tornillo}} \cdot \rho_{\text{tornillo}} + \rho_{\text{eje}} \cdot \pi L_t (R^2 - r^2) \quad (5.1)$$

siendo R el diámetro nominal de la tubería y r el menor. El valor aproximado del esfuerzo equivalente es  $3479,14[N] + 2253[N] \approx 5732[N]$ .

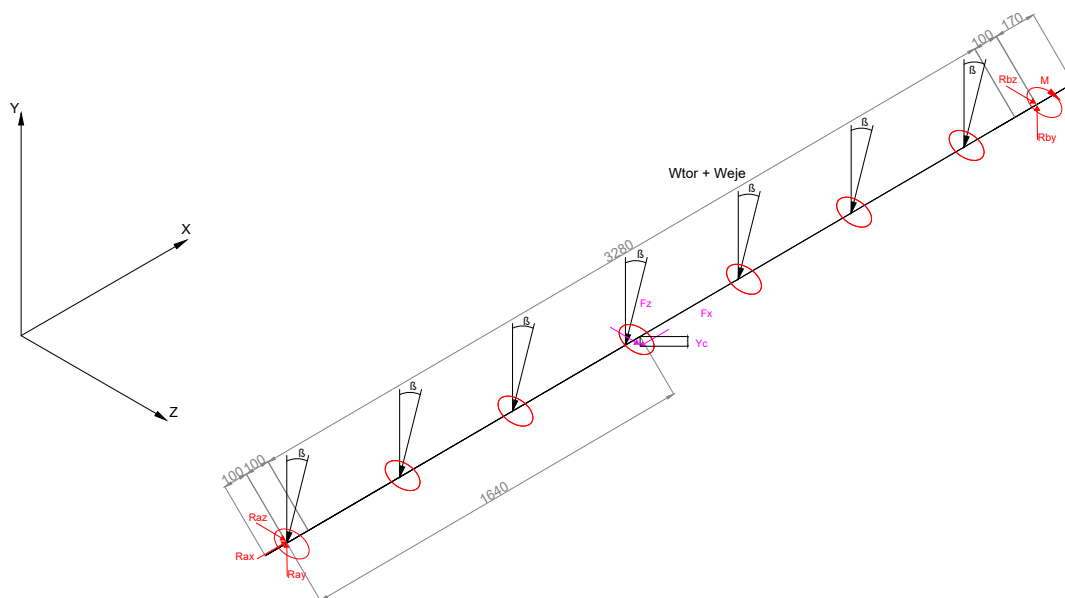


Figura 5.1: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas distribuidas

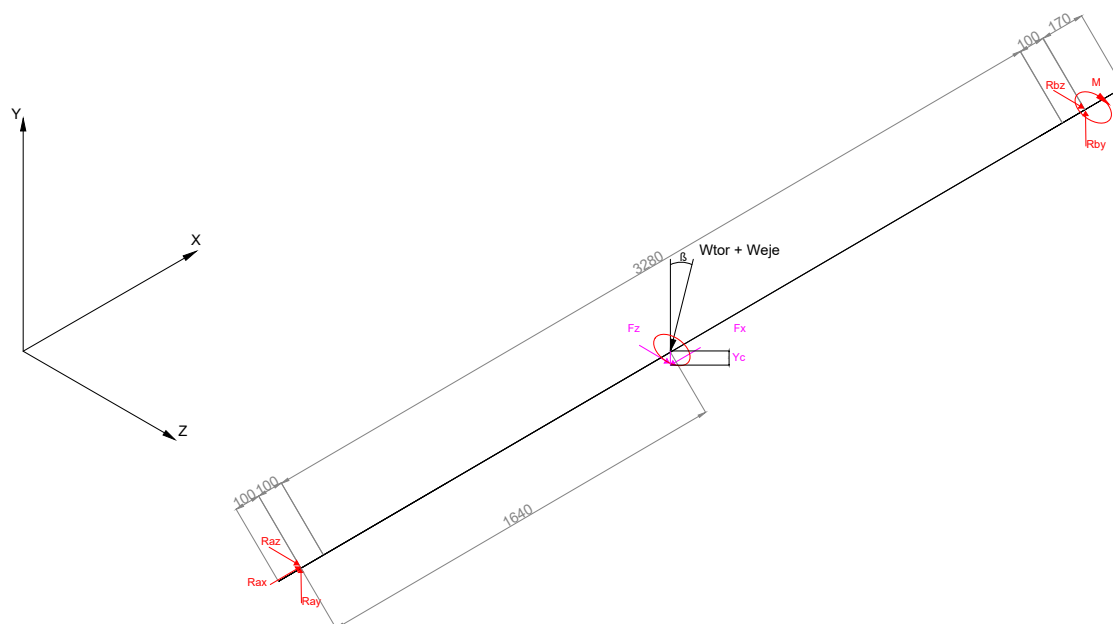


Figura 5.2: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas equivalentes

Para obtener el peso del agua que hay sobre el tornillo, primero debe calcularse el área de contacto. Depende del volumen de agua que hay circulando entre los huecos de las palas, por lo que una aproximación cercana sería utilizar la relación de volumen total ( $\nu_t$ ):

$$A_c = \nu_t \pi (D_o/2)^2 = 0,604 [m^2] \quad (5.2)$$

El peso del agua luego será:

$$P_{agua} = A_c L_b g \rho_{agua} = 8874 [N] \quad (5.3)$$

#### 5.4.1. Fuerza del agua sobre el tornillo

Sabiendo cual es el peso del agua sobre el tornillo se debe descomponer este esfuerzo en las direcciones principales como se indica en las figuras 5.1 y 5.2

Mediante sencillas relaciones trigonométricas, puede obtenerse las fuerzas que ejerce el agua en las palas ( $F_x$  y  $F_z$ ) y el canal del tornillo ( $F_y$ ):

$$F_x = P_{agua} \cdot \sin(\beta) = 4437[N] \quad (5.4)$$

$$F_y = P_{agua} \cdot \cos(\beta) = 7685[N] \quad (5.5)$$

$$F_z = F_x \cdot \tan(\alpha) = 6970[N] \quad (5.6)$$

El cojinete A soporta empuje axial y carga radial, por lo tanto tiene tres reacciones. El cojinete B soporta únicamente carga radial y tiene 2 reacciones. También se agrega una incógnita M de momento flexionante. El esfuerzo  $F_y$  realizado por el peso del agua se distribuyó como carga a lo largo de todo el tornillo uniformemente. En total son 6 componentes de incógnitas desconocidos. Para encontrar las reacciones:

$$R_a = R_{ax}\hat{\mathbf{i}} + R_{ay}\hat{\mathbf{j}} + R_{az}\hat{\mathbf{k}} \quad (5.7)$$

$$R_b = R_{by}\hat{\mathbf{j}} + R_{bz}\hat{\mathbf{k}} \quad (5.8)$$

$$F_x = -F_x\hat{\mathbf{i}} \quad (5.9)$$

$$F_z = F_z\hat{\mathbf{k}} \quad (5.10)$$

Luego el peso del tornillo y agua será:

$$W_t = -(P_{agua} + P_{eje})\sin(\beta)\hat{\mathbf{i}} - (P_{agua} + P_{eje})\cos(\beta)\hat{\mathbf{j}} \quad (5.11)$$

Y las ecuaciones de equilibrio quedan:

$$\sum F_x = 0 \quad (5.12)$$

$$0 = R_{ax}\hat{\mathbf{i}} - F_x\hat{\mathbf{i}} - W_t\sin(\beta)\hat{\mathbf{i}} \quad (5.13)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (5.14)$$

$$0 = R_{ay}\hat{\mathbf{j}} + R_{by}\hat{\mathbf{j}} - W_t\cos(\beta)\hat{\mathbf{j}} - F_y\hat{\mathbf{j}} \quad (5.15)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (5.16)$$



$$0 = R_{az}\hat{\mathbf{k}} + R_{bz}\hat{\mathbf{k}} - F_z\hat{\mathbf{k}} \quad (5.17)$$

$$\sum M = 0 \quad (5.18)$$

$$0 = \frac{L}{2}\hat{\mathbf{i}} \times (-W_t \cos(\beta))\hat{\mathbf{j}} + \left(\frac{L}{2}\hat{\mathbf{i}} - y_c\hat{\mathbf{j}}\right) \times (-F_x)\hat{\mathbf{i}} + \left(\frac{L}{2}\hat{\mathbf{i}} - y_c\hat{\mathbf{j}}\right) \times F_z\hat{\mathbf{k}} + L\hat{\mathbf{i}} \times (R_{by}\hat{\mathbf{j}} + R_{bz}\hat{\mathbf{k}}) + M\hat{\mathbf{i}} \quad (5.19)$$

Es un sistema de 6 ecuaciones con 6 incógnitas. Resolviendo se obtiene:

$$M_i \approx 1680[Nm] \quad (5.20)$$

$$R_{ax} \approx 7,317[kN] \quad (5.21)$$

$$R_{ay} \approx 5,83[kN] \quad (5.22)$$

$$R_{az} \approx -3,485[kN] \quad (5.23)$$

$$R_{by} \approx 6,79[kN] \quad (5.24)$$

$$R_{bz} \approx -3,485[kN] \quad (5.25)$$

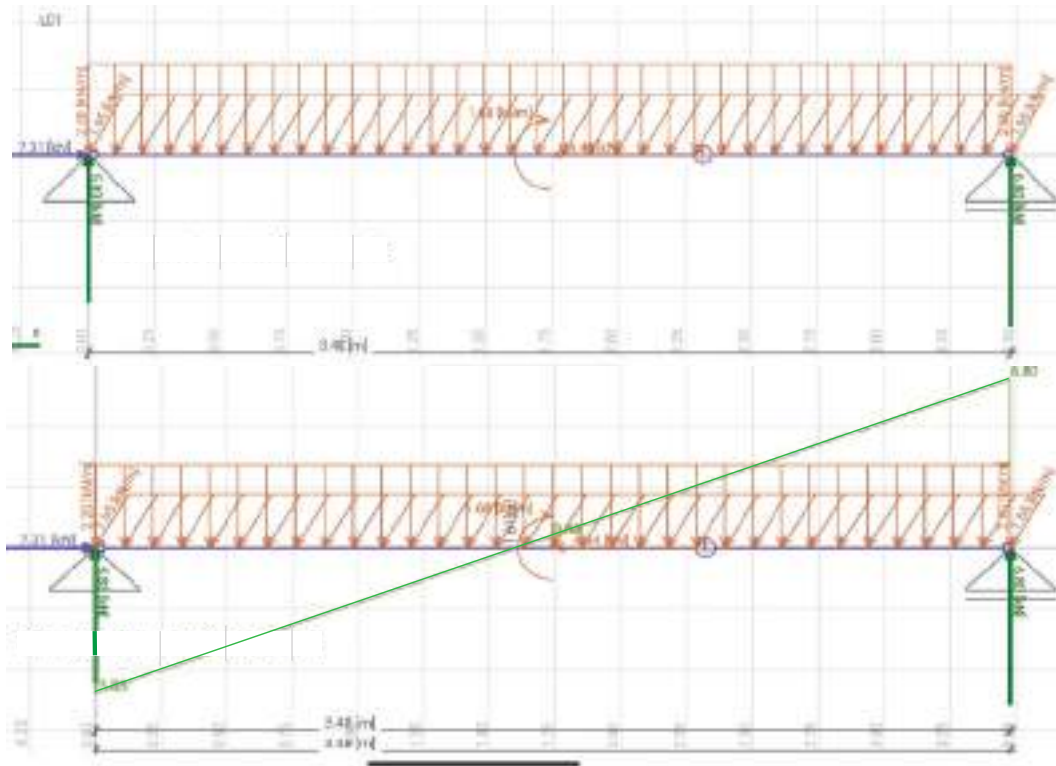


Figura 5.3: Diagrama de corte plano XY

Donde el momento es el generado por la fuerza  $F_x$  en  $Y_c$ .

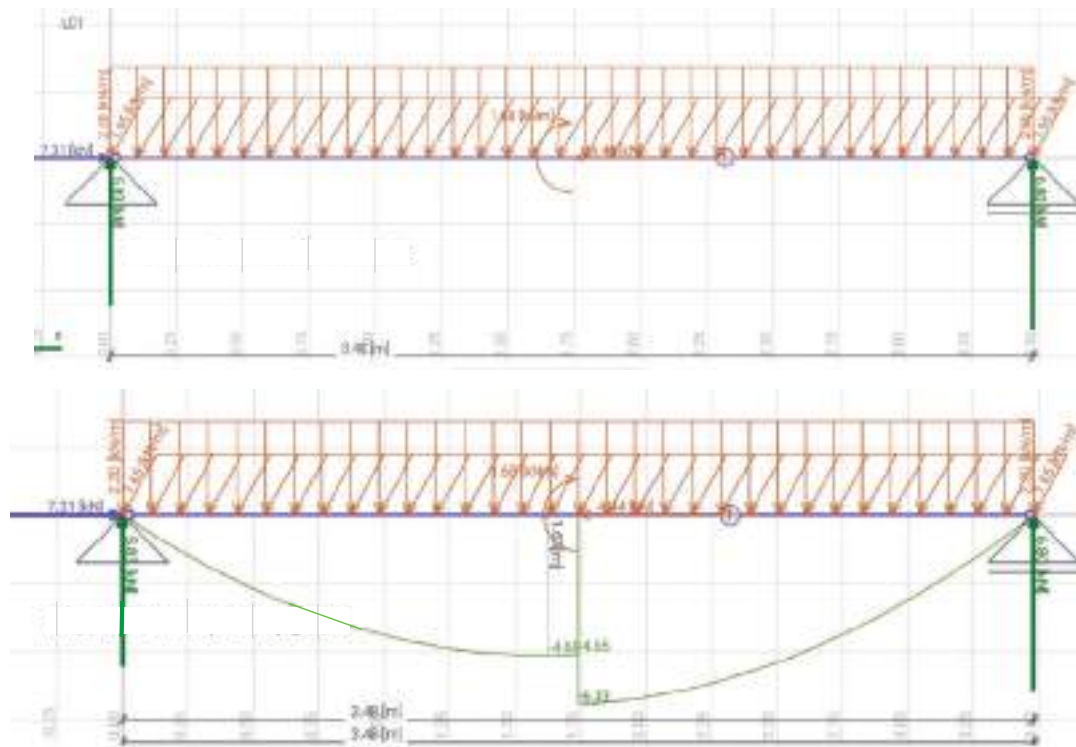


Figura 5.4: Diagrama de momento en z

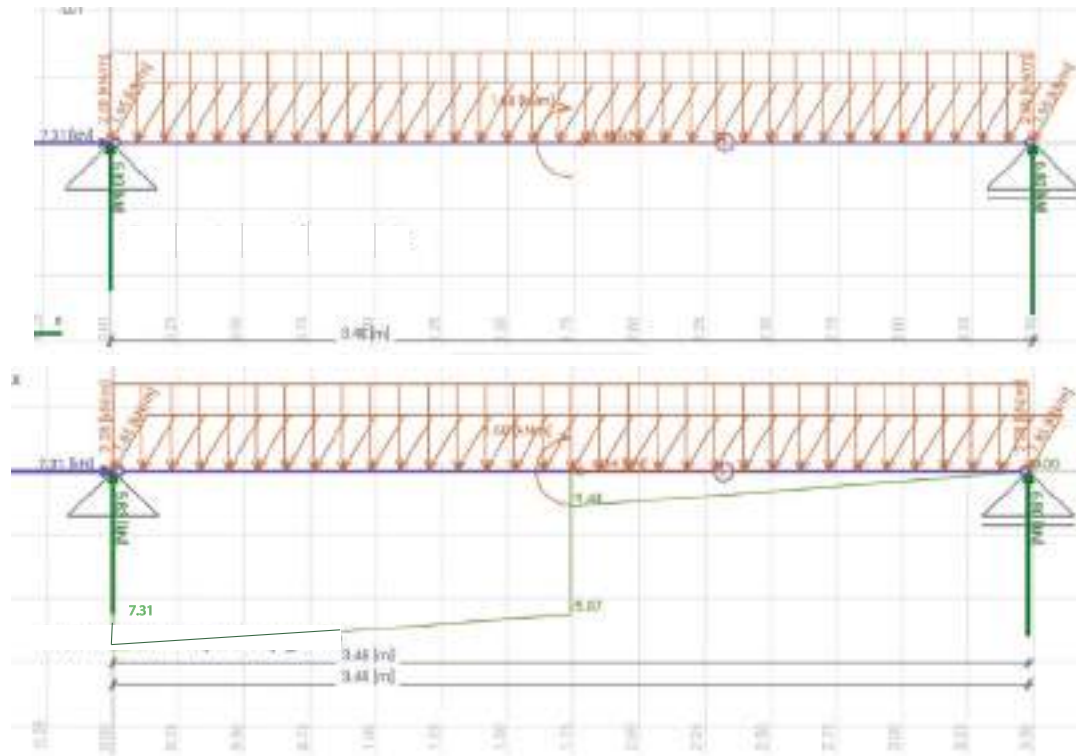


Figura 5.5: Diagrama de esfuerzos normales plano XY

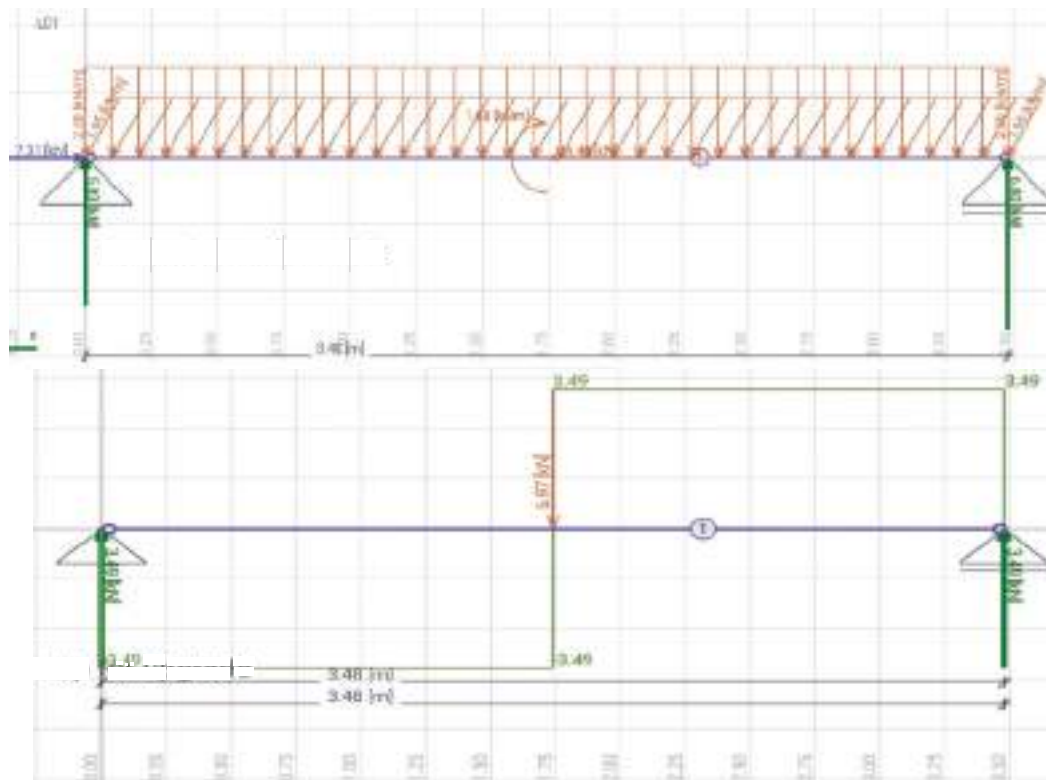


Figura 5.6: Diagrama de corte plano XZ

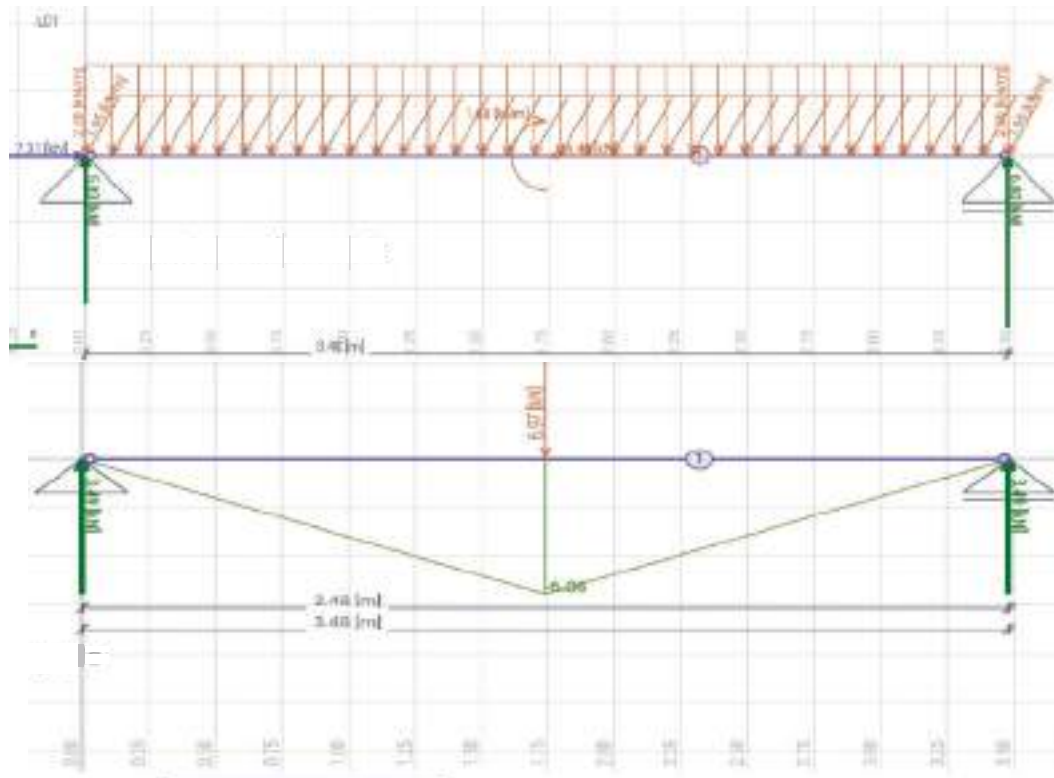


Figura 5.7: Diagrama de momento en y

#### 5.4.2. Cálculo del diámetro del arbol considerando tensiones estáticas

Se va a seleccionar el diámetro del eje que se considere apto para soportar las sollicitaciones que el proyecto demanda.

Un componente de una máquina falla cuando en algún punto del mismo la tensión sobrepasa un valor límite, la tensión podrá ser la normal, y cortante o ambas a la vez. Debido a lo anterior existen diversos criterios a la hora de definir el fallo de una pieza: para materiales dúctiles se emplea la teoría de la tensión cortante máxima, afirma que la falla se inicia en la fluencia, siempre que el esfuerzo cortante máximo que resulta del círculo de Mohr sea mayor al esfuerzo cortante máximo que resulta de un ensayo de tracción.

Para materiales frágiles se emplea la teoría de Coulomb-Morh. Esta teoría establece que la fractura se produce un estado de esfuerzos tal que origina un círculo tangente a la envolvente de los dos círculos resultantes generados en los ensayos de tensión y compresión.

El coeficiente de seguridad conservador es un dato aproximado que se toma de la tabla 5.10, que está basada en la experiencia, que indica unos valores aproximados para

los coeficientes de seguridad que en muchos casos sirven de referencia.

	Factor de seguridad
\N	Aplicación
2	Si la aplicación de la carga es en extremo suave (incertidumbre moderada)
4	Cuando existen choques o cargas de impacto moderadas
>4	Piezas solicitadas a cargas con choque o impacto importante

Tabla 5.10: Factores de seguridad [46]

Considerando la teoría de fallas, el factor de seguridad conservador se extrae de la tabla 5.10  $N = 3$ . Para buenos materiales en piezas sometidas a cargas imprecisas o en casos de tensiones no bien determinadas. El cálculo provisto por la ASME sin tener en cuenta dimensionamiento debido a pandeo es:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32N^2 \sqrt{(C_{fl} \cdot M_f)^2 + (C_{to} \cdot M_t)^2}}{\pi \sigma_f}} \tag{5.26}$$

siendo:

- N: factor de seguridad.
- $C_{fl}$  Coeficiente de flexión.
- $C_{tt}$  Coeficiente de torsión.
- $M_t$  Momento torsor.
- $M_f$  Momento flector.
- $\sigma_f$  Esfuerzo de fluencia. Para el acero SAE 1020 se considera de aproximadamente 370 MPa (enrolado en caliente y estirado en frío).

	$C_f$ y $C_t$		
Carga	Constante o gradualmente aplicada	Súbita con choques ligeros	Súbita con choques importantes
$C_f$	1,2 a 1,5	1,5 a 2	2 a 3
$C_t$	1 a 1,2	1,2 a 1,5	1,5 a 3

Tabla 5.11: Factores  $C_f$  y  $C_t$  [46]

La carga será constante y sin cargas dinámicas fuertes en régimen permanente por lo que se elige  $C_f = 1,35$  y  $C_t = 1,1$ . Se obtiene un  $d = 76,33 < 150[mm^2]$ .

### 5.4.3. Cálculo de sollicitación por fatiga

Con la tensiones de fluencia y rotura, se obtienen los siguientes datos respecto al eje y teniendo en cuenta que el coeficiente de seguridad es  $s=3$ . Se ha determinado el límite de fatiga corregida para todas aquellas secciones del árbol que pueden ser críticas. Por lo tanto es necesario determinar el valor de los coeficientes correctores en cada una de las secciones consideradas críticas.

$$\sigma_{wc} = C_s \cdot C_t \cdot C_c \frac{\sigma'_n}{K_f} \quad (5.27)$$

donde  $\sigma'_n = \frac{S_u}{2} = 220[MPa]$

El factor de superficie  $C_s$  para un acabado por maquinado y estirado en frío es [46]:

$$C_s = 2,7\sigma_u^{-0,265} = 0,9 \quad (5.28)$$

El factor de tamaño  $C_t$  se calcula para los diferentes puntos críticos del árbol si el diámetro es mayor a 100[mm] es de 0.75 y el factor de confiabilidad  $C_c = 0,9$  [46].

El factor de sensibilidad a la entalla  $K_f$  se obtiene de :

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (5.29)$$



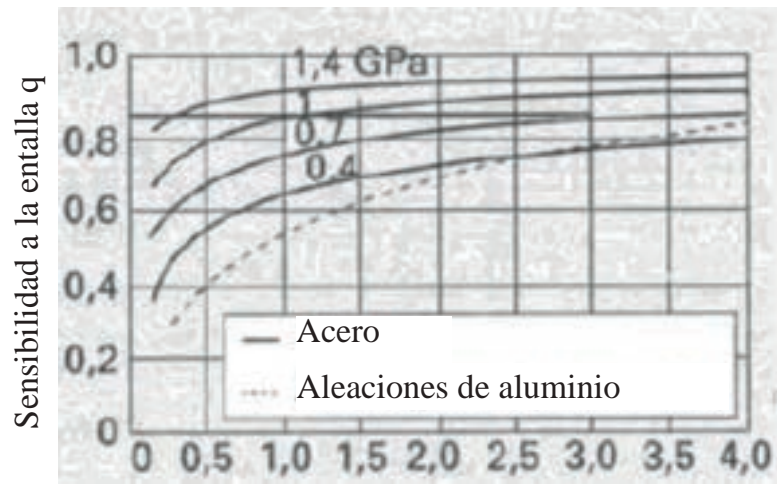
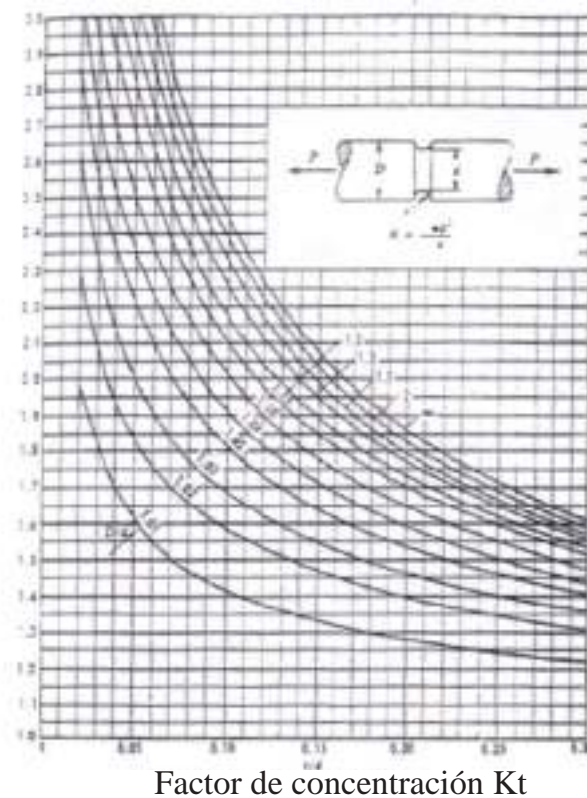


Figura 5.8: Sensibilidad a la entalla "q"

Tensiones	[MPa]
$\sigma_f$	370
$\frac{\sigma_f}{s}$	123.3
$\tau_f$	185
$\frac{\tau_f}{s}$	61.66

Tabla 5.12: Tensiones material

Figura 5.9: Factor de concentración  $K_t$ 

Sin embargo, aunque el apoyo será por interferencia, se considerará el caso que se realice un pulido en la zona de los cojinetes con profundidad 0.5 [mm] para un mejor calce del rodamiento. Con una relación de  $\frac{r}{d} = 0,3$  se obtiene un  $K_t = 1.1$ , obteniéndose un  $K_f = 1,055$ .

Punto crítico	$C_s$	$C_t$	$C_c$	$K_f$	$\sigma_{wc}$
A	0.9	0.75	0.9	1.055	126.66[MPa]
Medio	0.9	0.75	0.9	1	133.64
B	0.9	0.75	0.9	1.055	126.66[MPa]

Tabla 5.13: Resultados de tensiones fatiga

Para el cálculo de las tensiones en las secciones tenemos:

$$\tau_m = \frac{2M_t D}{\pi(r_{ext}^4 - r_{int}^4)} \quad (5.30)$$

$$\sigma_a = \frac{4M_f D}{\pi(r_{ext}^4 - r_{int}^4)} \quad (5.31)$$

Utilizando la línea de Goodman se obtiene el factor de seguridad para las secciones analizadas [49]

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{wc}} + \frac{\tau_m}{\sigma_u} = \frac{1}{N} \quad (5.32)$$

Punto crítico	$M_f$ [kNm]	$M_t$ [kNm]	$\sigma_a$	$\tau_m$ [MPa]	$\sigma_{wc}$	Factor de seguridad
A	0.25	1.68	2.01	6.754	126.66[MPa]	32
Medio	8.76	1.68	70.43	6.754	133.64	1,92 $\approx$ 2
B	0.35	1.68	2.81	6.754	126.66[MPa]	26

Tabla 5.14: Resultados de tensiones fatiga

Se considera que cumple los requerimientos ya que se ha dimensionado en el diseño, donde se ha usado un nivel de agua superior al de diseño cumpliendo un margen de seguridad.

#### 5.4.4. Elección de rodamientos

Ambos rodamientos se considera que deben durar un periodo de 3 años mínimo y al no ser de funcionamiento continuo total se lograría una operación con poco o nulo mantenimiento ( $L_{10h} = 26280[hs]$ ) por lo que, suponiendo que trabaje las 24 hs del día:

$$L_{10h} = \frac{L_{10}, 10^6}{60.n} \quad (5.33)$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10h}, 60.n}{10^6} = 66,54[millonesdeciclos] \quad (5.34)$$

De la ecuación de la vida despejamos el valor de C requerido para la vida útil estimada:

$$C = P \cdot \sqrt[b]{L_{10}} \quad (5.35)$$

Se elige un rodamiento de bolas para carga que pueda soportar carga axial y el sugerido por el fabricante para cargas con inclinación de  $30^\circ$  es de 1 hilera de bolas con contacto angular o de 4 puntos. Para estos rodamientos de bolas  $b = 3$ . "P" es la fuerza combinada equivalente dada por [47]:

$$P = X.F_r + Y.F_a \tag{5.36}$$

Para el rodamiento de la parte baja se tiene una relación  $\frac{F_a}{F_r} > 1$  se recomienda un rodamiento con sufijo B que soporte un ángulo de trabajo de 40°.

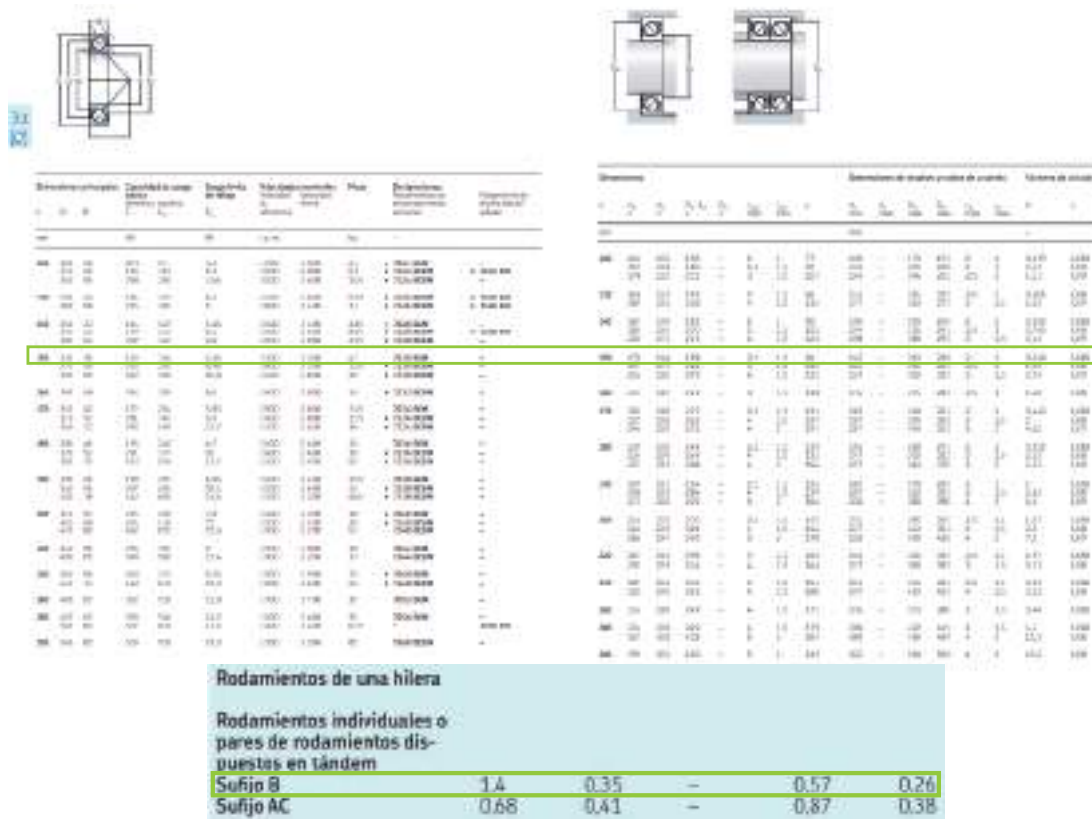


Figura 5.10: Selección de rodamiento inferior

Debe realizarse una verificación por carga estática y dinámica si el rodamiento trabaja a más de 10 [rpm]. La relación entre la suma de las fuerzas radiales y la axial es menor a "e" por lo que:

$$P_{din} = F_r = 6,79[kN] \tag{5.37}$$

Por lo que la capacidad de carga mínima que debe cumplir es:

$$C_{DinMin} = P_{din} \cdot \sqrt[3]{L_{10}} = 27,51[kN] \tag{5.38}$$

El rodamiento cumple ampliamente los requisitos mínimos,  $C_{DinMin} < C_{din} = 133[kN]$ . En cuanto a la carga estática, como  $P_0 < F_r$  se considera según el fabricante  $P_0 = F_r$  por lo que cumple también  $C_{EstMin} < C_{est}$ .

Para el rodamiento de la parte superior se tiene una relación  $\frac{F_a}{F_r} < 1$ . No soporta cargas axiales por lo que es aconsejable un rodamiento de bolas. No se realiza el cálculo de soporte por cargas axiales porque son pequeñas o nulas [47].

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades de referencia		Roca	Designaciones	Bolsas en el paquete en unidades libres	Bolsas en el paquete
d	D	B	C <sub>10</sub>	C <sub>90</sub>	F <sub>10</sub>	V <sub>10</sub>	V <sub>90</sub>				
mm			kN	kN	N	r.p.m.	mm/s	H	-		
100	20	48.8	81	1.36	4.700	4.300	1.7	-	K1820	-	-
110	25	69.4	91	1.46	4.700	4.300	1.25	-	K1820HR	-	-
110	25	69.4	91	1.46	4.700	4.300	3.05	-	K1820HR	-	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	1.55	-	K2020	-	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	1.9	-	K2020M	-	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	4.3	-	K2020	-	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	4.3	-	K2020-2000	K2020-2000	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	10	-	K2020-32	K2020-32	-
125	34	94.2	98	1.56	4.800	4.400	10	-	K2020	-	-
170	45	174	148	1.8	4.800	4.500	11.5	-	K2200M	-	-
170	45	174	148	1.8	4.800	4.500	23	-	K2200	-	-
170	45	174	148	1.8	4.800	4.500	25.5	-	K2200M	-	-

Dimensiones						Dimensiones de resacas y radios de acuerdo				Factores de cálculo	
d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	r <sub>1,2</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>
mm					mm						
100	162	-	178	-	2.5	156	-	184	3	0.015	17
162	-	178	-	1.1	156	-	184	1	0.015	17	17
169	-	192	-	2	159	-	201	2	0.02	16	16
174	-	200	-	1.1	156	-	219	1	0.02	17	17
174	-	-	206	2.1	160	-	215	2	0.025	16	16
174	-	-	206	2.1	160	-	215	2	0.025	16	16

U <sub>r</sub> , U <sub>a</sub>	Rodamientos de una fila y de dos filas Juego normal			Rodamientos de una fila Juego C3			Juego G4		
	e	s	y	e	s	y	e	s	y
0.370	0.19	0.36	0.2	0.29	0.46	1.89	0.38	0.44	1.47
0.380	0.22	0.41	0.22	0.31	0.49	1.71	0.4	0.44	1.4
0.400	0.26	0.44	0.21	0.34	0.46	1.62	0.43	0.44	1.3
0.43	0.28	0.46	0.25	0.38	0.46	1.61	0.46	0.44	1.23
0.45	0.3	0.51	0.25	0.4	0.48	1.54	0.47	0.44	1.18
0.47	0.34	0.55	0.25	0.44	0.46	1.51	0.5	0.44	1.12
0.48	0.38	0.46	0.25	0.49	0.46	1.5	0.55	0.44	1.03
0.517	0.42	0.51	0.28	0.54	0.42	1.41	0.58	0.44	1
0.537	0.44	0.51	0.2	0.54	0.42	1	0.58	0.44	1

Figura 5.11: Selección de rodamiento superior

Para la verificación por carga estática y dinámica tenemos una relación entre la suma de las fuerzas radiales y la axial es menor a "e" por lo que:

$$P_{din} = F_r = 7,64[kN] = P_{est} = P \tag{5.39}$$

Por lo que la capacidad de carga mínima que debe cumplir es:

$$C_{DinMin} = P \cdot \sqrt[3]{L_{10}} = 30,95[kN] \tag{5.40}$$

El rodamiento cumple ampliamente los requisitos mínimos que indica el catálogo, es decir, cumplirá con la vida de utilidad que se prevee para el proyecto.

## 5.5. Conclusiones

Evaluando los datos de las sollicitaciones mecánicas que soportarán los elementos mecánicos a través de las simulaciones y cálculos se eligieron los materiales que sean adecuados procurando el menor impacto, costo y facilidad de fabricación. La simulación del fluido a través de la turbina facilitó el cálculo ya que hubiera sido de gran dificultad su cálculo sin software. Esta simulación permitió decidir cual era el material mas conveniente para resistir el comportamiento fluidodinámico de la descarga de agua. Se calculó y se verificó los elementos principales para el funcionamiento. Estos fueron sobredimensionados para obtener una durabilidad del proyecto y un mantenimiento correctivo esporádico.

# Capítulo 6

## Análisis económico

Los costos de instalación de una micro central se pueden dividir en 4 rubros y cuyos porcentajes rondan en los valores [48]

Categoría	Costo [%]
Obras civiles	15 - 40
Equipo electromecánico	45 - 55
Infraestructura	10 - 15
Costos indirectos	10 - 15

Tabla 6.1: Costos de la obra

Los porcentajes varían dentro de los rangos de acuerdo a la tecnología que se aplique, la potencia a instalar, tipo de turbina, etc. La estructura de costos para esta instalación se puede dividir en:

1. Inversión inicial

- a) Activo Fijos

- 1) Obras civiles

- a' Costos directos

- Obras preliminares
- Reforma de represa
- Excavación de canal
- Obra de apoyo de carcasa
- Obra de delimitación al público

- b' Costos indirectos

- Instalación y conexión
- Logística

- Supervisión
  - Imprevistos
- 2) Maquinaria y equipamiento
- Generador imanes permanentes
  - Turbina
  - Equipo y accesorios para conexión y seguridad
  - Equipo de conversión y protección
- 3) Relacionados a instalación de la turbina
- Rodamientos de apoyo
  - Bastidor estructural
  - Costos de instalación
  - Conexiones
- b)* Activos intangibles
- c)* Diseño final de proyecto
- d)* Gastos misceláneos
- e)* Asesoría técnica
- f)* supervisión

## 2. mantenimiento y operación

- Limpieza esporádica
- lubricación
- Repuestos de elementos pasra generación
- Repuestos de elementos para trasmisión

Se puede aproximar teniendo en cuenta el valor estimativo de los equipos y obras a través de catálogos y ventas:



Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD\$]	Precio total [USD\$]
Excavación ( [50])	$m^3$	80	10.6	848
Hormigón ( [50])	$m^3$	25	58.3	1458
Compactación ( [50])	$m^3$	80	14.65	1172
Mano de obra	%	3	231	695
Costos misceláneos	%	-	-	500
Supervisión y logística	-	-	-	800
Rectificador e inversor controlado PWM Delta	1	1	1328+562+210	2100 (sin impuestos PAIS)
Cables	m	64	2.675	171.2
Tubo acero estructural x 6m	1	1	65	65
Cañerías acero galvanizado	caños	7	26.5	185
Gabinete estanco	-	1	92	92
Termomagnética y disyuntor	-	1	343	343
Generador síncrono de imanes permanentes	-	1	1390 (sin impuestos PAIS)	1390
Turbina y proceso de moldeo	-	1	3500 (sin impuestos PAIS)	3500
Rodamientos inferior y superior	-	1	540	540
Soporte rodamiento	-	1	422	422
Bastidor soporte de acero y elaboración	-	1	850	850
Extras	-	-	700	500

Tabla 6.2: Costos de la obra civil

Los valores de excavación fueron tomados en base a una remoción de 80 [ $m^3$ ] de tierra blanda con medios mecánicos. La obra civil se estima según valores de cemento, cal y piedra. La mano de obra se obtuvo de un 20% de los costos de la misma.

En distintos proyectos de prefactibilidad de microcentrales se utiliza como estimativo del costo total del proyecto un determinado costo por capacidad. En la foto 6.1 se ve un gráfico comparativo entre los costos de las centrales tradicionales con los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos [48].

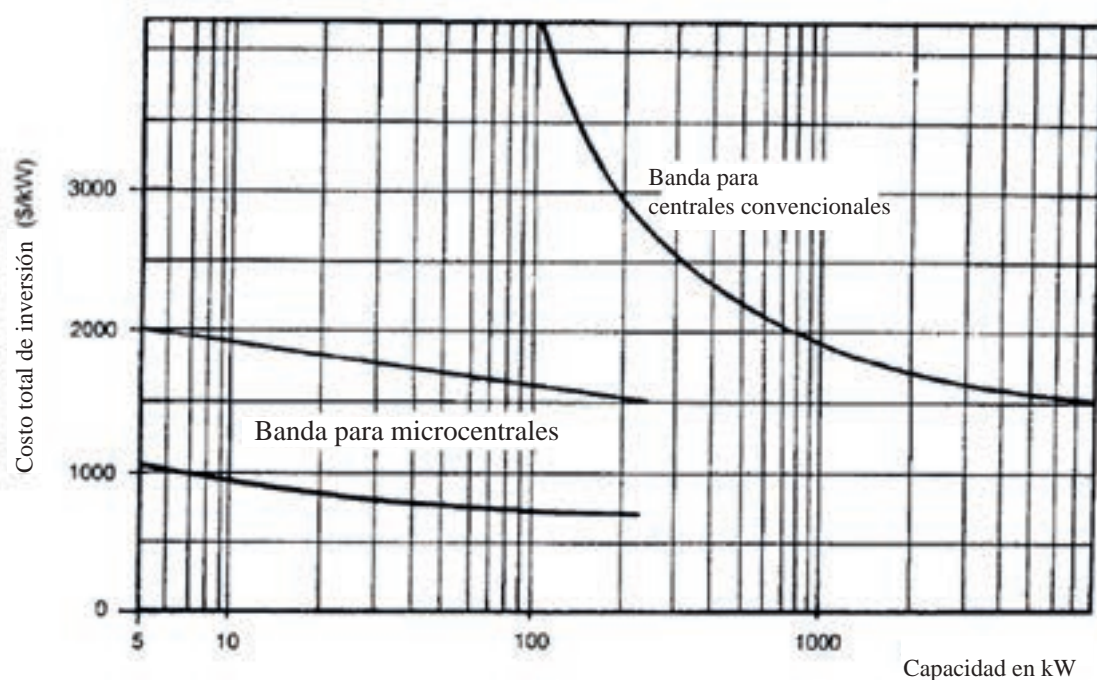


Figura 6.1: Diagrama de momento en y

La principal diferencia que se presenta es en el costo del mantenimiento. Las pequeñas y micro- centrales no presentan grandes costos en este aspecto. También en la operación, pueden funcionar sin personal interviniente. Si se tiene en cuenta los márgenes de costos en este proyecto se estima un costo superior al mismo. Esto es debido al alto costo de turbina ya que se necesita una fabricación "artesanal" a través de procesos de moldeo y un equipo rectificador-inversor de elevado costo.

Según los costes esperados se espera una inversión cercana a 15.500 U\$D. Este valor es cercano a lo indicado en el gráfico.

### 6.0.1. Vida útil de proyecto

Se estima una vida útil del proyecto de 25 años tanto para el equipo electromecánico como para el equipo de transmisión de potencia y obras civiles. Se tiene en cuenta que se cumplirán las labores de mantenimiento previstas y en los tiempos pautados.

### 6.0.2. Cálculo de depreciación

El cálculo de depreciación nos brinda la pérdida del valor de los equipos y obra por el paso del tiempo mismo. Debe considerarse un período de tiempo determinado. Existen diversos métodos para el cálculo de depreciación en instalaciones, se utilizó el método de depreciación línea por la simplicidad. Se considera que el bien pierde su valor anualmente de manera uniforme lo cual se considera que se ajusta dentro de lo previsto.

El valor residual del bien en un año determinado se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$VR_n = V_i - V_i \frac{n}{N} \quad (6.1)$$

Donde:

- $VR_n$ : Valor residual en el año n, en US\$.
- $V$ : valor inicial de bien.
- $N$ : vida útil de bien
- $n$ : tiempo de uso del proyecto

Tomando según los valores especulados de costos de la obra se calcula que los costos de la obra civil integra el 30% de la inversión total y el equipo electromecánico el 55% y un tiempo estimado de proyecto de 20 años.

Para las obras civiles:

$$VR_{ob} = 4650 - 4650 \frac{20}{25} = 930 [USD] \quad (6.2)$$

Y para el equipo electromecánico:

$$VR_{eq} = 8525 - 8525 \frac{20}{25} = 1705 [USD] \quad (6.3)$$

## 6.1. Flujo de caja

El beneficio económico o utilidad propia de la generación presenta un ahorro para el sistema eléctrico interconectado. La creación de este tipo de microcentrales se puede ver como generación de energía a costo nulo ya que no presenta mayores costes que los relacionados al mantenimiento.

Se calcula en la tabla 6.3 el flujo de caja anual utilizando el valor anual promedio de la energía y sumándole el valor residual de las instalaciones en el último año, obteniendo los beneficios por año. Se estima que como costo de mantenimiento un valor de 100 USD anual.

La tarifa media total según el ente nacional regulador de la electricidad se ubica en el orden de PESOS CINCO COMA CIENTO VEINTISIETE MILÉSIMAS POR KILOVATIO HORA ( $5,127 \frac{\$}{kWh}$ ) en el boletín oficial del 2021, es decir aproximadamente unos  $0.05184 [\frac{USD}{kWh}]$  tomando el dólar oficial a 98.89 [AR\$] [52]. Este será el valor que se "ahorrará" anualmente y se verá reflejado en los beneficios. Este valor será un valor a comparar, deberá calcularse el valor de generación de la turbina para el caso de este proyecto.

### 6.1.1. Cálculo del costo de KW-h de la instalación

Para determinar el valor del KW-h consumido en el proyecto dividimos el costo total de la instalación por el número de Kilovatios-hora consumidos durante toda la vida del proyecto. Teóricamente el proyecto generará teóricamente  $48.180 [\frac{kWh}{año}]$ . El costo total de la microcentral se obtiene sumando el costo de inversión inicial más los costos de operación y mantenimiento de todos los años de vida del proyecto:

$$Costostotales = Costoinversión + Costosdeoperaciónymantenimiento(20años) \quad (6.4)$$

Resultando:

$$Costostotales = 15500 + 100[USD], 20[años] = 17500[USD] \quad (6.5)$$

Sabiendo su capacidad de generación de aproximadamente 5.5 [kW] y asumiendo que pueda generar 16 [Hs] al día por 320 días se obtiene una generación anual de 28160 [kWh] y en 20 años de 396000 [kWh]. Por lo tanto el costo real por kWh se calculó de la siguiente manera:

$$CostokWh = \frac{Costostotales}{Generacióndelproyecto} = \frac{17500}{563200} = 0,0310[\frac{USD}{kWh}] \quad (6.6)$$

Se realiza la salvedad de que el precio del costo por kWh y el precio del dólar se mantenga constante en el tiempo. Es notable que el valor de costo de generación se aproxima al del distribuidor. Se espera que el costo de generación se reduzca con el pasar de los años debido a la implementación de tecnologías más avanzadas y un crecimiento de las energías renovables. El beneficio será el valor que se ahorra evitando contratar energía tradicional.

Flujo de caja							
Año	Beneficios			Costos			Flujo de caja
	Valor de energía	Vr	Beneficio	Inversión	Mantenimiento	Costo total	
1	0	0	0	15500	0	15500	-15500
2	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
3	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
4	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
5	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
6	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
7	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
8	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
9	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
10	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
11	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
12	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
13	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
14	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
15	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
16	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
17	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
18	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
19	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8
20	1459.8	2635	4094.8		100	100	3994.8

Tabla 6.3: Beneficios anuales

### 6.1.2. Rentabilidad

El método del valor presente neto incorpora el valor del dinero en determinado tiempo de flujos de efectivo netos de un negocio o proyecto.

El objetivo del valor presente neto es realizar las comparaciones entre los periodos en los que el proyecto o negocio tuvo diferentes flujos de efectivo. El valor depende de la tasa de interés a la que se ajusta el cálculo del valor presente neto. El método para calcular el valor presente neto es a través de un quebrado o razón aritmética, en donde el numerador es el dinero y el denominador corresponde a la tasa de interés.

El valor presente del proyecto es igual a la diferencia entre el valor presente de los flujos anuales de fondos y la inversión inicial total.

$$V_p = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I_t \quad (6.7)$$

Donde

- $V_p$ : Valor presente del proyecto con una tasa de interés  $i$ .

- $FC_j$ : Flujo de caja del año  $j$ .
  
- $i$ : Tasa de interés asignada.
  
- $I_t$ : Inversión total.

Se toma como valor de referencia para la tasa de interés la TNA (Tasa Nominal Anual) en dólares del Banco Nación de La República Argentina la cual al 6 de octubre de 2021 tiene un valor de 1,75% [53].

El Valor Presente Neto sirve para generar dos tipos de decisiones: ver si las inversiones son efectuables y ver qué inversión es mejor que otra en términos absolutos. Los criterios de decisión se basan en lo siguiente:

- $V_p > 0$ : la tasa de descuento elegida generará beneficios.
  
- $V_p < 0$ : el proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.
  
- $V_p = 0$ : el proyecto de inversión no generará beneficios ni pérdidas, por lo que su realización resultará indiferente.

Debería aceptarse si tiene un valor presente neto positivo, cuando los flujos de efectivo esperados se descuentan al costo de oportunidad. Si el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. Según el cálculo para un tiempo de 20 años de proyecto:

Valor presente neto								VP acumulado
Año	Beneficios		Costos			Flujo de caja		
	Valor de energía	Vr	Beneficio	Inversión	Mantenimiento			Costo total
1	0	0	0	15500	0	15500	0	-15500
2	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-14140.14
3	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-12780.4
4	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-11420.6
5	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-10060.8
6	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-8701
7	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-7341.2
8	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-5981.4
9	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	-4621.6
10	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	3261.8
11	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	1902
12	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	542.2
13	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	817.6
14	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	2177
15	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	3537.2
16	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	4897
17	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	6256.8
18	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	7616.6
19	1459.8	0	1459.8		100	100	1359.8	8976.4
20	1459.8	2635	4094.8		100	100	3994.8	12971.2

Tabla 6.4: Valor presente neto

Se verifica que el valor presente es positivo. Se verificará la tasa interna de retorno (TIR) para definir la rentabilidad.

### 6.1.3. Cálculo de tasa interna de retorno TIR

La Tasa Interna de Retorno o TIR es la tasa de interés o de rentabilidad que nos ofrece una inversión. Así, se puede decir que la Tasa Interna de Retorno es el porcentaje de beneficio o pérdida que conllevará cualquier inversión. Es la tasa con la cual el valor presente se hace igual a cero. Si la TIR obtenida es mayor que la utilizada en el proyecto, el proyecto se considera rentable. Puede obtenerse la tasa de interés  $r$  o TIR resolviendo la ecuación:

$$\sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+r)^j} - I_t \quad (6.8)$$

Resolviendo con los flujos de caja de la tabla 6.4. Flujo de caja anual del proyecto se obtiene una TIR=6%, mayor a la utilizada, por lo tanto también se verifica la rentabilidad del proyecto. Se verifica que ante un posible mayor costo de inversión o costes de mantenimiento ocasionales no previstos debido a fluctuaciones de precios y extras el sistema a largo plazo generará un ahorro.

## 6.2. Conclusión

En este capítulo se logró llevar a cabo el estudio económico y brindando con valores reales un estimativo de la rentabilidad del proyecto. Para ello se debió realizar un análisis de las tareas que se debían llevar a cabo y una búsqueda de presupuesto para ellas y para los materiales involucrados. Según estos resultados queda en manifiesto que podría llegar a ser rentable si se cumplen las condiciones antes mencionadas y los costos estimados.

Si bien el costo por generación por kWh es superior a la producida por otras energías renovables (como la solar) este valor resulta competitivo frente a los precios de distribución por concesión y distribución por algunas cooperativas. Incluso podría representar un ahorro.



# Capítulo 7

## Impacto ambiental

En el presente capítulo se realizará una identificación, análisis, descripción y clasificación de los impactos positivos y negativos que pueden afectar a los distintos componentes del ambiente por el emplazamiento, operación y mantenimiento de la turbina.

### 7.0.1. Metodología

Se deben identificar en primera instancia:

- Acciones del proyecto: tareas con potencialidad de alterar el medio. Se han tenido en cuenta las etapas de emplazamiento, operación, mantenimiento, y abandono.
- Factores Ambientales: aspecto, recurso o parámetro del medio susceptible de ser modificado. Pueden ser físico-químicos, biológicos, paisajísticos, sociales, culturales, humanos y económicos.

### 7.0.2. Acciones del proyecto

A fin de ordenar el análisis, se han dividido las distintas acciones de la obra en tres etapas:

- Emplazamiento.
- Operación y Mantenimiento.
- Abandono y retiro

Las acciones consideradas para la etapa de emplazamiento son las siguientes:

- Excavación de la zanja del Arroyo y otros movimientos de suelos: contempla todas las acciones y tareas necesarias para la apertura de las zanjas que requerirá rebajar el nivel del lado seco, nueva nivelación del desagüe, operaciones de remodelación de la presa existente y eventuales enterramiento de conexiones eléctricas.

- Circulación de maquinarias y operación de equipos: se refiere a la circulación y operación de las máquinas excavadoras y zanjadoras, generadores de energía, inclusive automotores de la inspección, supervisión y auditorías, y cualquier otro tipo de maquinaria necesaria para la ejecución de la obra. Incluye el movimiento de vehículos y camiones
- Trabajos con soldadura/fusión, perforación u otros trabajos en zanja y presa: involucra las tareas necesarias para la instalación de la turbina, reacondicionamiento de la presa y distintas operaciones relacionadas al montaje.
  1. emplazamiento de canalizaciones
  2. Movilización de piezas y montaje
  3. Movimientos y circulación de vehículos y equipos / Interrupción y disturbios en la circulación vehicular y peatonal.
  4. Contingencias: se consideran todos los accidentes o incidentes que puedan ocurrir durante las tareas de construcción (derrames de aceites u otros fluidos, tala de árboles y arbustos, movilización de residuos, etc)
  5. Etc.

Las acciones consideradas para la etapa de operación y mantenimiento son las siguientes:

- Operación: puesta en funcionamiento
- Tareas de mantenimiento y manejo de compuerta: Mano de obra en general, movimiento de vehículos, maquinarias, equipos, etc.
- Vallado del área para obstruir el acceso del público en general.
- Desagote de la compuerta (rotativo)
- Contingencias: se consideran todos los accidentes que puedan ocurrir durante las tareas de mantenimiento (caídas de herramientas, derrames, etc.)

Las acciones consideradas para la etapa de abandono y retiro son las siguientes:

- Abandono: se consideran aquí las operaciones de desconexión eléctrica de la turbina. Incluyen la limpieza y posibles vaciados.
- Retiro: se analizará esta acción en caso de que se elija que ambiental y técnicamente sea conveniente retirar la turbina, implicando excavación, retiro y tapada de las zanjas.
- Contingencias: se consideran todos los accidentes que puedan ocurrir durante las tareas de abandono y/o retiro.

**Factores ambientales considerados** Los componentes del subsistema natural (físicos y biológicos) considerados son los siguientes:

- Suelo
- Agua
- Calidad de aire
- Flora y fauna
- Paisaje

Para el subsistema socioeconómico se han tenido en cuenta, en conjunto, los siguientes aspectos:

- Población
- Actividades económicas y empleo
- Infraestructura existente

## 7.1. matriz de importancia de impactos

La Matriz de Impacto Ambiental que a continuación se describe y utiliza, tiene un carácter cuantitativo en donde cada impacto es calificado según su importancia [54].

Se ha seguido la metodología propuesta por Vicente Conesa Fernández-Vitora (1997, Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental), que utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la importancia:

$$I = [3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC] \quad (7.1)$$

Donde:

- I: Importancia del impacto
- i: Intensidad o grado probable de destrucción
- EX: Extensión o área de influencia del impacto
- MO = Momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto
- PE = Persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto
- RV = Reversibilidad
- SI = Sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples



Signo		Intensidad (I)	
Beneficioso	+	Baja	1
Perjudicial	-	Media	2
		Alta	3
		Muy Alta	8
		Total	12
Extensión (E)		Momento (M)	
Puntual	1	Largo plazo (más de 5 años)	1
Parcial	2	Medio plazo (1 a 5 años)	2
Extenso	4	Inmediato o corto plazo (< 1 año)	4
Total	8	Crítico	8
Crítica	12		
Presistencia (P)		Reversibilidad (R)	
Fugaz (< 1 año)	1	Corto plazo (< 1 año)	1
Medio (1 a 10 años)	2	Medio plazo (1 a 10 años)	2
Permanente (+ 10 años)	4	Irreversible (+ 10 años)	4
Sinergia (S)		Acumulación (AC)	
No sinérgico	1	Simple	1
Moderadamente Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
Indirecto	1	Irregular o impredecible	1
directo	4	Periódico (cíclica o recurrente)	2
		Continuo	4
Recuperabilidad (MC)		$I = \pm [3I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$	
Recup. inmediatamente	1		
A medio plazo	2		
Mitigable o compensable	4		
Irrecuperable	8		

Figura 7.1: Modelo de importancia de impacto [54]

En función de este modelo, los valores extremos de la importancia (I) pueden variar entre 13 y 100. Según esa variación, se califica al impacto ambiental de acuerdo con la siguiente propuesta de escala

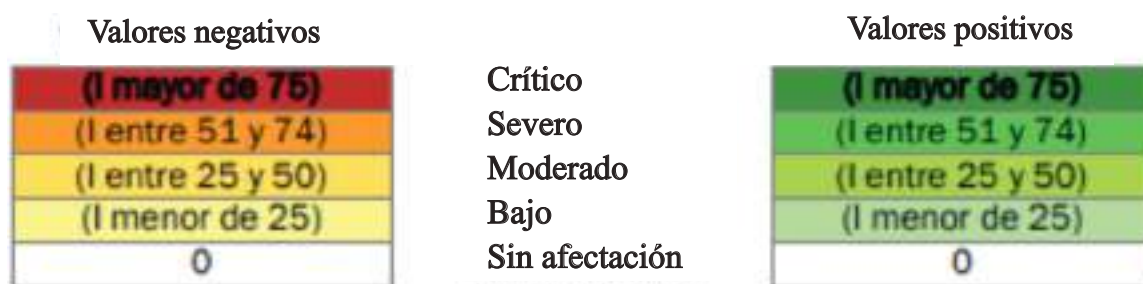


Figura 7.2: Modelo de importancia de impacto [54]

Un impacto bajo es aquel que resulta irrelevante en comparación con los fines y objetivos del Proyecto en cuestión. Un impacto moderado es aquel cuya afectación no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas. Un impacto severo es aquel en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la adecuación de medidas correctoras o protectoras y en el que, aún con esas medidas, la recuperación necesita un período de tiempo dilatado. Un impacto crítico es aquel cuya magnitud es superior al umbral aceptable. Con este impacto se produce una pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas correctoras.

## 7.2. Resultados de análisis

A continuación se presentan los resultados del análisis de la evaluación de los potenciales impactos ambientales del proyecto de la Turbina, que se resumen en la Matriz de

---

Evaluación presentada al final del presente capítulo, considerando la etapa de emplazamiento y construcción, la de operación y mantenimiento, y la de abandono y/o retiro. Se analizan, para cada uno de los componentes del sistema ambiental receptor, los efectos positivos o negativos derivados del Proyecto. Se presenta en la tabla 7.3 los resultados.





**Etapas de construcción** La excavación de la zanja y otros movimientos de suelos generarían impactos en cuanto a sus propiedades físicas (compactación, remoción, escurrimiento superficial) y químicas (a partir del vuelco de sustancias ajenas a su constitución original). Principalmente es afectado durante las excavaciones pertinentes. La circulación de maquinarias y operación de equipos podría generar pérdidas de hidrocarburos (combustibles y lubricantes) e impactar el suelo, afectando su calidad. Por eso para esta etapa se proponen medidas de mitigación:

Efectos ambientales	Medidas de mitigación
Generación de polvos en operaciones de excavación.	-Realizar reparos contra la acción del viento. -Instalación de obrador cercano. - Minimizar tareas de tareas en las cercanías de la laguna.
Tareas de montaje, perforaciones, etc.	-Instalación de obrador cercano. -Maximizar el cuidado con moviliación de piezas y líquidos.
Alteración de aguas y suelos por derrames de combustibles, aceites de máquinas y residuos.	- Maximizar cuidado y minimizar movilización de líquidos que puedan afectar negativamente agua y suelos -Instalaciones sanitarias para el personal apropiadas al sitio (baños químicos)
Circulación de maquinarias	- Delimitar area de circulación de maquinaria -Correcta coordinación de tareas que requieran trabajo de maquinarias
Alteración de la Calidad del Agua	-Deben retirarse posibles residuos en las cercanías de las obras - Correcta limpieza del canal luego terminada la obra. -Planificación adecuada del proceso de preparación del sitio de obra, zonificación de áreas de trabajo y almacenamiento temporario de residuos.
Riesgos para la población circulante y miembros de mantenimiento	-Debe cumplirse la correcta delimitación del área de la obra, cumpliéndose normas de seguridad e higiene. - Cumplimiento y supervisión de normas municipales sobre procedimientos constructivos, ocupación y uso de la vía pública durante la construcción. -Disminuir tareas de ensamblaje evitables en el área de obra para disminuir ruidos, impacto en paisaje y suciedad.
Riesgos para la seguridad física de la población aguas abajo de la presa.	- Disminución de residuos en el punto de desagüe. -Controlar y seguir el régimen de control de compuerta indicado por el miembro estatal encargado de descarga (OSSE). -Realizar un seguimiento anual de la obra civil para evitar ocasionales subidas y desbordes, erosión y demás cuestiones que puedan atentar contra la seguridad de la población en general.
Alteración de fauna y flora del área	-Restauración de la capa de suelos afectada -Revegetación de las áreas afectadas, donde sea posible, con especies herbáceas y arbóreas de fácil arraigo en el lugar.

**Etapas de operación y mantenimiento** La operación de la turbina, en condiciones de funcionamiento normales, no generaría ningún impacto sobre el suelo, aire, ni agua. No obstante, las ocasionales tareas de mantenimiento previstas podrían contaminar o generar residuos en las cercanías de presa. Se considera que en el caso de contingencias, como por ejemplo un derrame de hidrocarburos generaría impacto negativo en el suelo y agua tanto en lado mojado como seco.

Efectos ambientales	Medidas de mitigación
Alteración del ecosistema acuático.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpieza de residuos en las cercanías de la compuerta de descarga y presa</li> <li>-Corrección de manipulación de compuerta de descarga para evitar desagües excesivos.</li> </ul>
Riesgos de población	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coordinación de tareas de apertura de compuerta por el miembro reesponsable (OSSE).</li> <li>-Limpieza de cercanías a la presa de residuos.</li> <li>-Delimitación de área de circulación restringida.</li> <li>-Reducción de tareas que involucren contaminación sonora y ambiental en horarios turísticos.</li> </ul>
Riesgos de personales de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisión y monitoreo de cumplimiento de normas de seguridad e higiene.</li> <li>-Control de los dispositivos de protección y de puesta a tierra en las Obras de Distribución.</li> <li>- Control y verificación de disyuntores diferenciales.</li> <li>- Uso de arnés en tareas de altura realizadas en la presa.</li> </ul>

**Etapa de abandono y retiro** El abandono y retiro podría provocar cambios en el suelo y agua debido a circulación de maquinaria pesada para el desmontaje. También se tendrían que tener en cuenta residuos y contingencias durante los trabajos. Se debería repetir las mismas medidas de mitigación que para el montaje de la obra.

### 7.3. Conclusión

En este capítulo se estudió como las tareas y modificaciones que fueron propuestas en este trabajo impactarían en el ambiente incluyendo la población, paisaje, etc. El impacto mayor se daría en la etapa de construcción y las operaciones de mantenimiento casi ni afectarían las características del lugar. Se podría supervisar las tareas durante la construcción para disminuir aún mas el impacto negativo.

# Capítulo 8

## Conclusiones

A continuación se presenta en las figuras una vista preliminar de la instalación de la turbina en la obra modificada de la presa.

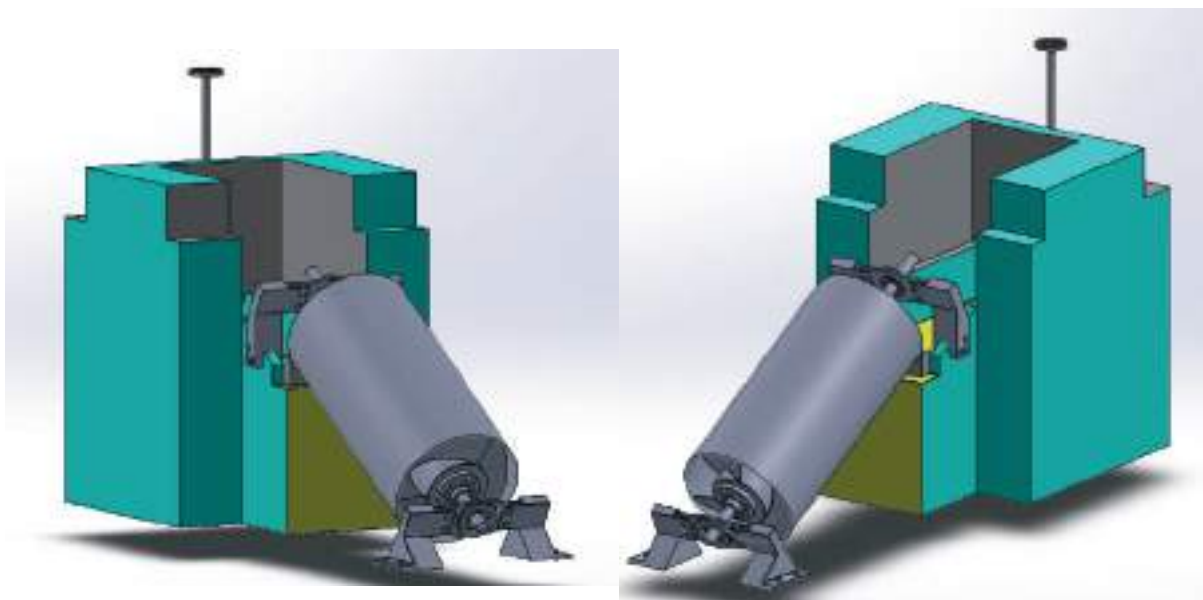


Figura 8.1: Vista preliminar de la turbina. Vistas laterales.

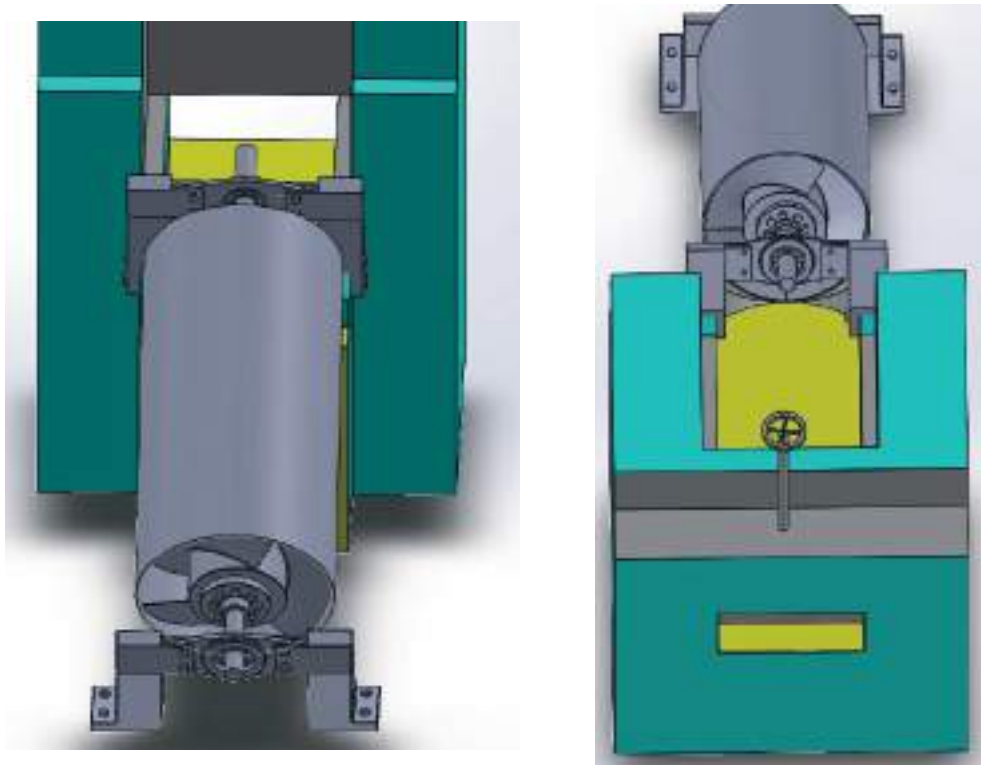


Figura 8.2: Vista preliminar de la turbina. Vista superior

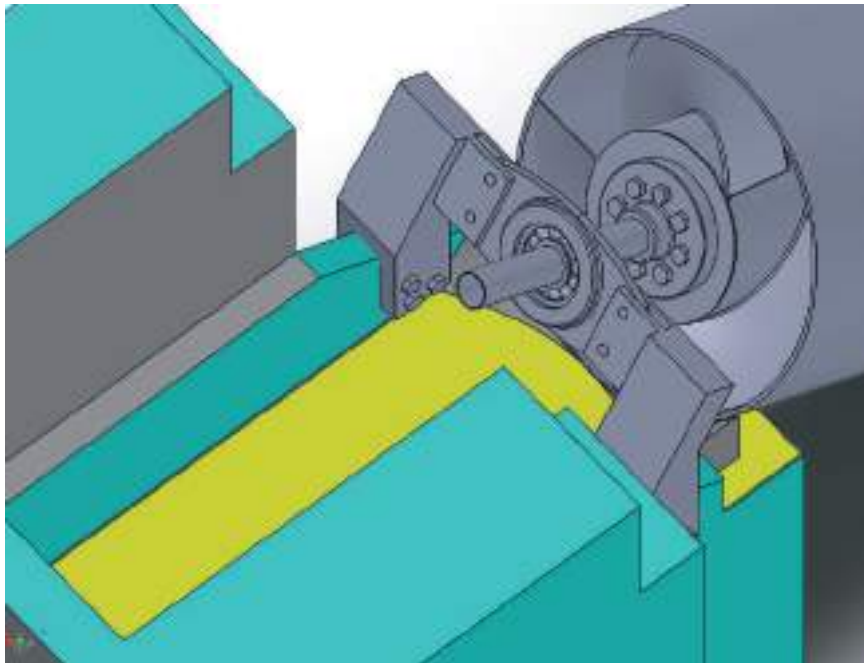


Figura 8.3: Vista preliminar de la turbina

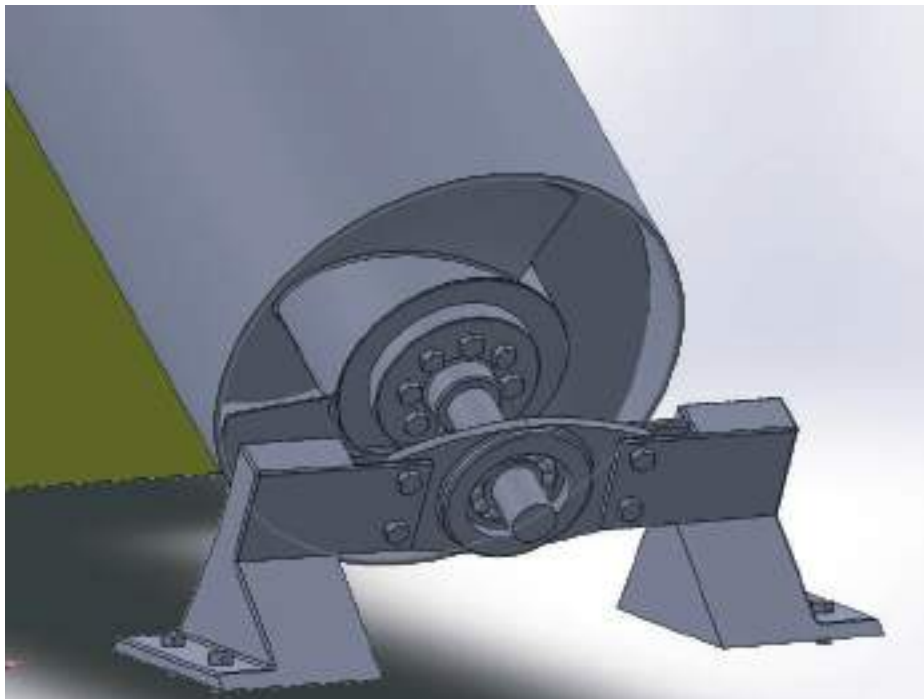


Figura 8.4: Vista preliminar de la turbina

## 8.1. Conclusiones finales

A modo de cierre es conveniente retomar algunos conceptos antes mencionados y poner de manifiesto el desarrollo de las Energías Renovables como motor de la diversificación de la Matriz Energética a nivel global y en particular para la República Argentina.

Hay una necesidad de cambiar las matrices energéticas que se encuentran hoy fuertemente vinculadas a los combustibles fósiles hacia matrices con mayor base en fuentes de energías renovables. El éxito de una medida de mitigación, es el establecimiento de acciones que permitan a la sociedad mitigarlos con medidas que se adaptan a ella y le permitan además seguir desarrollándose como es el caso de emplazamientos distribuidos como el caso estudiado.

Se seleccionó una turbina de Arquímedes para este proyecto de investigación porque es una turbina novedosa, es posible su instalación para saltos pequeños, su montaje es más fácil y económica que una turbina tradicional, además al ser una turbina ecológica su estudio es más amplio. Este tipo de runner al funcionar a velocidades lentas no perjudicará la vida de la fauna de la laguna ya que los choques son disminuidos.

La implementación de este tipo de turbinas requiere un estudio de la zona, características hidrológicas y demás como lo realizado en el Capítulo 2. La recaudación de información en colaboración con el Instituto de Geología y Costas permitió entender como se comporta el ciclo hidrológico de la laguna de Los Padres Además, cada caso es particular y no puede generalizarse en un caso. Esto impactaría en la fabricación de la turbina tanto para el equipo de conversión como los elementos mecánicos. El diseño geométrico es un punto clave para las turbinas de Arquímedes, se siguió diversos estudios recientes por diversos autores y proyectos existentes para lograr un cálculo óptimo.

Para el cálculo de los parámetros técnicos se realizó cálculos en Matlab para hacer comparaciones con otro tipo de ángulos, numero de filetes, salto de altura y caudal. Se encontró eficiente el ángulo de  $30^\circ$  para el diseño de la turbina, con esto se comprueba que los grados más eficientes para el diseño de un AST está en el intervalo de  $22^\circ - 36^\circ$ . Teniendo en cuenta mientras más bajo sea el ángulo en dicho rango, el torque será mayor. Además es apropiado ya que se tiene una longitud de la turbina mas corta aminorando el costo de fabricación. La cantidad de filetes que tiene el tornillo eleva el rendimiento pero a la vez dificulta su elaboración por lo cual se llega a un valor óptimo de 3 aletas.

El material de la turbina más apropiado se seleccionó gracias a la utilización de un software CFD para simular e introducir las condiciones de contorno necesarias. Se llevaron a cabo largos tiempos de compilación debido a que estos software requieren gran precisión de modelado para resultados fidedignos. La realización de la turbina suele hacerse de forma artesanal o por fabricantes específicos que trabajan este tipo de materiales. En cuanto a elementos mecánicos para el soporte de la turbina son de "facil" acceso en nuestra economía local ya que existen distribuidores nacionales y a precios competitivos. Se han calculado las solicitaciones de las partes móviles y en contacto con el agua. Los elementos fueron calculados y dimensionados para soportar la vida útil del proyecto con un mantenimiento esporádico.

Para la fabricación, se considera la resina de polyester ya que son materiales ligeros su deformación no es muy alta, tiene buen comportamiento con el agua y el costo de fabricación no sería demasiado a comparación de otros materiales.

La simulación del modelo de conversión eléctrica permitió ver la respuesta del sistema frente a cambios repentinos del caudal. Sin embargo, en el caso de la compuerta en estudio, el caudal permanecerá constante y tiene un comportamiento poco turbulento comparado con las situaciones simuladas. Se logró ver con este software y con ayuda de otros modelos ya investigados la capacidad de generación y el diseño de los convertidores de potencia. Los convertidores PWM son elementos que se utilizan ampliamente en este tipo de proyectos ya que permiten regular automáticamente tanto frecuencia como tensión y filtrar los armónicos brindando energía de calidad a los usuarios de estos puntos aislados. Se diseñó por último la instalación eléctrica, su conexión con la red, un plan de seguridad de parada debido a que es una zona turística donde hay población circulante y la puesta

a tierra correspondiente. Será necesario cumplir el plan de mantenimiento para mantener los equipos funcionando correctamente.

En cuanto al análisis económico, se encontró que la instalación de la turbina presenta un beneficio y hasta un ahorro a largo plazo ya que permite recuperar la inversión y a un costo por kWh competitivo comparado con tarifas de distintas cooperativas. Vendiendo a precio de mercado podría recuperarse la inversión en aproximadamente la mitad del proyecto. Esta energía se inyecta directamente a la red o podría utilizarse para consumos cercanos, lo que alivianaría la demanda de la red en un punto terminal como es la de este proyecto, los huecos de tensión característicos de estos puntos se podrían ver reducidos.

Es necesario un avance en tecnología en los aprovechamientos hidroeléctricos para que sea competitivo en términos económicos con otros tipos de energías renovables como es el caso de la energía fotovoltaica. Si bien se demuestra que frente a este tipo de generación no es competitivo ya que es necesaria una mayor inversión, permite clarificar los diversos nichos y posibilidades a futuro para investigar y desarrollar en energías renovables. Sin embargo, las microcentrales hidroeléctricas permiten obtener una instalación fiable, robusta que puedan suministrar pequeñas cantidades de energía a bajo costo y casi nulo mantenimiento que permita llegar a sitios aislados o comunidades lejanas.

Toda modificación del espacio público y la instalación de proyectos que puedan afectar la visual, fauna o flora u otro impacto en el ambiente debe pasar por una evaluación de impacto ambiental. Se ha realizado una evaluación de los impactos en distintos aspectos y en cada etapa del proyecto.

El principal objetivo de este trabajo es incentivar el uso de este tipo de turbinas en distintos desagües que puedan resultar "aprovechables". Para concluir, la aplicación de energías renovables hoy no solo es del campo de los investigadores, sino que es reclamado por la sociedad que ve con preocupación cada vez mayor como los recursos se agotan y requieren de alternativas que hagan sostenible el desarrollo de la sociedad, desafío que hoy necesita del encuentro de los distintos sectores de la sociedad.

## 8.2. Propuestas de trabajos futuros

A lo largo del proyecto, se detectaron posibilidades para trabajos futuros, que podrían darle continuidad al presente trabajo. Se detallan a continuación algunas líneas de investigación a futuro:

- Realización de prototipo a escala y estudio de mejoras para la optimización de generación.
- Diseño de convertidor de potencia para controlar frecuencia y tensión.



- 
- Re-estudio del proyecto para el almacenamiento de energía y su utilización en la zona.
  - Optimización del sistema generador y turbina.



# Apéndice A

## Scripts de MATLAB

### A.1. Introducción

En este apéndice se muestra lo realizado en el software MATLAB. Este es una herramienta muy potente que posee un lenguaje de programación que permite expresar directamente matrices matemáticas y arreglos vectoriales, permitirá realizar los cálculos y procedimientos de diseño de la turbina, cálculo de parámetros y demás para este proyecto.

#### A.1.1. Cálculo de parámetros y diseño de tornillo

El siguiente script contiene la información del tornillo obtenida del análisis y recompilación de información de estudios anteriores. Contiene los parámetros útiles para el diseño mismo y el cálculo de las dimensiones de la turbina.

```
% Cálculo de la geometría y el funcionamiento del tornillo óptimo para
% diferentes saltos de agua.
% Valores globales:
% fabricación, se suelen realizar de 1, 2 o 3 filetes.
% Además el proceso teórico está adaptado a
% un número de 3 filetes.
% m :número de filetes del tornillo. Se escoge un valor de 3.
m=3;
% Parámetros adimensionales para el diseño de la turbina
delta=0.5; %relación de diámetro exterior e interior.
beta = 30 %ángulo de inclinación de tornillo
%relación de paso y diametro externo
Pp = 1;
% Valores de entrada:
```

```

% Q: Caudal de entrada en la turbina [m3/s]
% H: Salto de agua de la instalación [m]
fprintf('-----VARIABLES DE ENTRADA-----\n')
Q = input('Caudal de entrada en el tornillo [m3/s]-----> ');
H = input('Altura neta de caída [m]-----> ');
% -----
% CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA Y FUNCIONAMIENTO DEL TORNILLO
% Relación de caudal y pérdidas está entre 0.02 y 0.06, se elige 0.06 para
% instalaciones pequeñas
if Q < 0.6
    Rp = 0.06;
elseif 0.6 <= Q && Q < 1
    Rp = 0.05;
elseif 1 <= Q && Q < 2
    Rp = 0.04;
elseif 2 <= Q && Q < 4
    Rp = 0.03;
else
    Rp = 0.02;
end

% el caudal util (Qu) será el caudal con el que se trabajará y se le debe
% restar las pérdidas Qp
Qp = Q * Rp
Qu = Q - Qp

% Se debe elegir el diámetro inicial para poder iniciar el proceso de
% iteración y poder conseguir el diámetro final. A partir de los resultados
% experimentales de Brada en 1999 se escoge el primer valor.

if Qu <= 0.01071
    Do = 0.28;
elseif 0.01071 < Qu && Qu <= 0.026077
    Do = 0.41;
elseif 0.026077 < Qu && Qu <= 0.041434
    Do = 0.5;
elseif 0.041434 < Qu && Qu <= 0.063404
    Do = 0.6;
elseif 0.063404 < Qu && Qu <= 0.097023

```

```
    Do = 0.72;
elseif 0.097023 < Qu && Qu <= 0.154961
    Do = 0.88;
elseif 0.154961 < Qu && Qu <= 0.233995
    Do = 1.05;
elseif 0.233995 < Qu && Qu <= 0.371467
    Do = 1.28;
elseif 0.371467 < Qu && Qu <= 0.580592
    Do = 1.55;
elseif 0.580592 < Qu && Qu <= 0.877334
    Do = 1.85;
else
    Do = 2.25;
end

% la velocidad máxima según Dellinger para tornillos que se comportan como
% turbinas generadoras es un poco mayor que para tornillos funcionando
% como bombas
nmax = 56 / (Do)^(2/3);

% el avance o paso será

Lambda = Pp * Do;

%Luego, la relación de avance a partir de las publicaciones de Nuernbergk
%y Rorres.

lambda = Lambda * tan(beta * pi / 180) / (pi*Do);
% Para obtener el valor del volumen de ratio de giro labda_v se debe seguir
% la gráfica aportada por Nuerngeberk y Rorres que relaciona este valor con
% la relacion de avance y el de diámetro. A partir de dicha gráfica, se
%establece la siguiente relación:

lambda_v = -4.2929*lambda^3+1.1272*lambda^2+0.1338*lambda+0.0214;

% A partir de estos valores puede obtenerse el valor de la velocidad de
% rotación del tornillo en funcionamiento

n = (Qu*60*tan(beta*pi/180))/(2*pi^2*(Do/2)^3*lambda_v);
```

```

% Puede que la velocidad de rotacion sea menor a la máxima lo que obliga a
% disminuir el diámetro
if n < nmax
    while(n < nmax)
        nmax = 56 / (Do)^(2/3);
        Lambda = Pp * Do;
        d = delta * Do;
        lambda = Lambda * tan(beta*pi/180)/(pi*Do);
        lambda_v = -4.2929*lambda^3+1.1272*lambda^2+0.1338*lambda+0.0214;
        n = (Qu*60*tan(beta*pi/180))/(2*pi^2*(Do/2)^3*lambda_v);
% La variación del diámetro se hace cada centímetro por cuestiones constructivas.
Do = Do - 0.01;
    end

% se deberá elegir el diámetro anterior antes del límite de la velocidad
% máxima
Do = Do + 0.02;
nmax = 56 / (Do)^(2/3);
Lambda = Pp * Do;
d=delta * Do;
lambda = Lambda * tan(beta*pi/180)/(pi*Do);
lambda_v = -4.2929*lambda^3+1.1272*lambda^2+0.1338*lambda+0.0214;
n = (Qu*60*tan(beta*pi/180))/(2*pi^2*(Do/2)^3*lambda_v);

%Si la velocidad de rotacion es mayor a la máxima:
else
    while(n >= nmax)
        nmax = 56 / (Do)^(2/3);
        Lambda = Pp * Do;
        d = delta * Do;
        lambda = Lambda * tan(beta*pi/180)/(pi*D);
        n = (Qu*60*tan(beta*pi/180))/(2*pi^2*(Do/2)^3*labda_v);
%La variación del diámetro es por centímetros y se obtiene el
%diámetro inmediatamente superior al límite con la velocidad máxima
Do = Do + 0.01;
    end

end

```

```

%Para el cálculo del ángulo de inclinación interior (alfa) y exterior
%(tita) de las palas del tornillo.
alfa = atan((pi*d/Lambda))*180/pi;
tita = atan((pi*Do/Lambda))*180/pi;

% Volumen de agua en un ciclo de tornillo según ecuación de Weisbach
%(Capítulo 2):

Vt = Qu * 60 / n;

% La relación de volumen es

v= Vt/(pi*Lambda*(Do/2)^2);

% Calculo de la velocidad de transporte axial:
Cax = Lambda*n/60;

% La relación de volumen total se puede obtener de la siguiente forma:
vtt = v + Qp/(pi*Cax*(Do/2)^2);

%A continuación se lleva a cabo el cálculo de altura adimensional k.
%Para ello se toman los valores de 1 hasta 0, según la gráfica expuesta por
% Nuernbergk y Rorres (2013), ya que en esta zona se encontrará el
%tornillo (llenado óptimo).
% En este caso, se busca comparar el valor de vtt calculado con el que se
% obtiene en función de la altura k (vt2):

for k = 0.5:0.0001:1
    alfa8 = 2 * acos(1 - k);
    alfa9 = 2 * acos((1-k)/delta);
    vt2 = (alfa8-alfa9*0.25)/(2*pi)-(1-k)/pi*(((1-(1-k)^2))^(1/2))-
% (0.25-(1-k)^2)^(1/2));
    if vtt <= vt2
        break

```

```

    end
end
% Altura del agua simplificada h3 según Nuernbergk y Rorres (2013):
h3 = k*d;

%A continuación se hacen las siguientes suposiciones: h1 = 0.175[m] y b1
%= 1.35[m]
% y b2=1.47[m]. De este modo según el estudio de Nuernbergk y Rorres, se pueden
% calcular de la siguiente forma los parámetros:
h1 = 0.175;
b = 1.35;
% Altura del agua en el plano perpendicular entrante en el tornillo:
h2 = 0.175;

% Factor de pérdida hidráulica:
E = (((vtt*pi*d)/(k*cos(beta*pi/180)*1.35))-1)^2;

w = h1 - h2 - 1/(2*9.81)*(Qu/(h2*b))^2*(1+E-((h2)/(h1))^2)

hin = h1 - w;

% luego, la altura de descarga óptima es

tao = (1+delta) * sqrt(1-(lambda/delta)^2) - 2*pi*lambda/m

%luego la altura de descarga es

h4=Do/2*cos(beta*pi/180)*tao

% Se debe modificar el largo del tornillo debido a que por el diámetro,
% toca el suelo del canal
Lxx= (H+d*cos(beta*pi/180)-hin-0.3)/sin(beta*pi/180)

```



```

% se deja 30cm de diferencia con el piso para el apoyo

%Luego la extensión del eje hueco será aproximadamente la décima parte del
%eje con hélices

% Distancia entre las palas, siendo el avance entre el número de filetes
Sx = Lambda/m;
% Número de palas del tornillo, siendo la longitud del tornillo dividido
% por la distancia entre palas
K = Lxx/Sx;

% El rendimiento del tornillo puede obtenerse a partir de las ecuaciones de
% Müller y Senior que relacionan lo relacionan con parámetros geométricos:

U = Sx* tan(beta*pi/180);
doo = h3-U;
rend= doo/U
rend_teo = (2*rend+1)/(2*rend+2);
rend_perd = 1-(Qp/Q);
rend_mec = (rend_perd*rend_teo);
% La potencia mecánica se puede estimar en
P_mec = (1000*9.81*H*Q*rend_mec)/1000;
% Así también, el par que existe en el eje puede calcularse como:
T_mec = 1000*P_mec/(n*2*pi/60);
% se le debe restar el torque debido a la fricción propia del tornillo dada
% por Dellinger
Cta= 0.000171*n+0.04605;
Tmec= T_mec - Cta;
% El par que existe en las palas del tornillo se calcula como:
Tf = Tmec/K;

%Imprimiendose los resultados:
fprintf('\n-----RESULTADOS-----\n')
fprintf('Salto de altura -----> %.2f m\n',H)
fprintf('Caudal medio -----> %.4f m3/s\n',Q)
fprintf('Ángulo de inclinación del tornillo -----> %.2f °\n',beta)
fprintf('Número de filetes helicoidales -----> %.0f \n',m)
fprintf('Caudal útil -----> %.4f m3/s\n',Qu)
fprintf('Caudal de pérdidas -----> %.4f m3/s\n',Qp)

```

```

fprintf('Diámetro exterior del tornillo -----> %.2f m\n',Do)
fprintf('Diámetro interior del tornillo -----> %.2f m\n',d)
fprintf('Longitud del tornillo -----> %.2f m\n',Lxx)
fprintf('Avance del tornillo -----> %.3f m\n',Lambda)
fprintf('Distancia entre dos palas -----> %.3f m\n',Sx)
fprintf('Ángulo del filo interior de las palas -----> %.2f °\n',alfa)
fprintf('Ángulo del filo exterior de las palas -----> %.2f °\n',tita)
fprintf('Ángulo del nivel de agua en cilindro ext. --> %.2f \n',alfa8*180/pi)
fprintf('Ángulo del nivel de agua en cilindro int. -->%.2f °\n',alfa9*180/pi)
fprintf('Número de palas -----> %.2f \n',K)
fprintf('Velocidad de rotación -----> %.2f rpm\n',n)
fprintf('Velocidad máxima de rotación -----> %.2f rpm\n',nmax)
fprintf('Relación de paso (Pr) -----> %.2f\n',Pp)
fprintf('Relación de diámetros -----> %.4f\n',delta)
fprintf('Relación de avance -----> %.4f\n',lambda)
fprintf('Volumen por ratio de giro -----> %.4f\n',lambda_v)
fprintf('Relación de volumen adimensional -----> %.3f\n',v)
fprintf('Relación de volumen total -----> %.3f\n',vtt)
fprintf('Volumen de agua en un ciclo del tornillo -----> %.3f m3\n',Vt)
fprintf('Altura del agua del canal (h1) -----> %.3f m\n',h1)
fprintf('Altura del agua en el plano perpendicular (h2)-----> %.3f m\n',h2)
fprintf('Altura de agua simplificada (h3) -----> %.3f m\n',h3)
fprintf('Altura del agua del canal (hin) -----> %.3f m\n',hin)
fprintf('Altura dede descarga óptima -----> %.3f m\n',h4)
fprintf('Altura adimensional (k) -----> %.3f \n',k)
fprintf('Velocidad axial de transporte -----> %.3f m/s\n',Cax)
fprintf('Diferencia de altura del nivel de agua en palas(U) ---> %.3f m\n',U)
fprintf('Rendimiento mecánico -----> %.3f\n',rend_mec)
fprintf('Potencia mecánica -----> %.3f kW\n',P_mec)
fprintf('Par de roce del tornillo -----> %.3f Nm\n',Cta)
fprintf('Par del tornillo -----> %.3f Nm\n',Tmec)
fprintf('Par por pala -----> %.3f Nm\n',Tf)

```

# Apéndice B

## Simulación fluidodinámica

### B.1. Introducción

En este apéndice se muestra lo realizado en el software ANSYS. Las simulaciones mediante CFD son una forma sencilla de conocer el funcionamiento real de diseños sin tener que invertir en altos costes de prototipos. Además, permite hacer rápidas variaciones pudiendo optimizar los modelos realizados.

Estos programas sin embargo asumen ciertas características que no siempre se corresponden al 100% con la realidad pero son útiles para trabajos de diseño ahorrando tiempo y dinero. El software utilizado en este caso es Ansys 20.

#### B.1.1. Diseño de grometría

Como primer paso, se creó un modelo de la turbina diseñada en capítulos anteriores a través de un espacio de diseño brindado por el programa CFD en conjunto con SolidWorks, creando la geometría en este último y exportandola hacia el espacio de Ansys. Las características geométricas están dadas por la tabla 3.9.

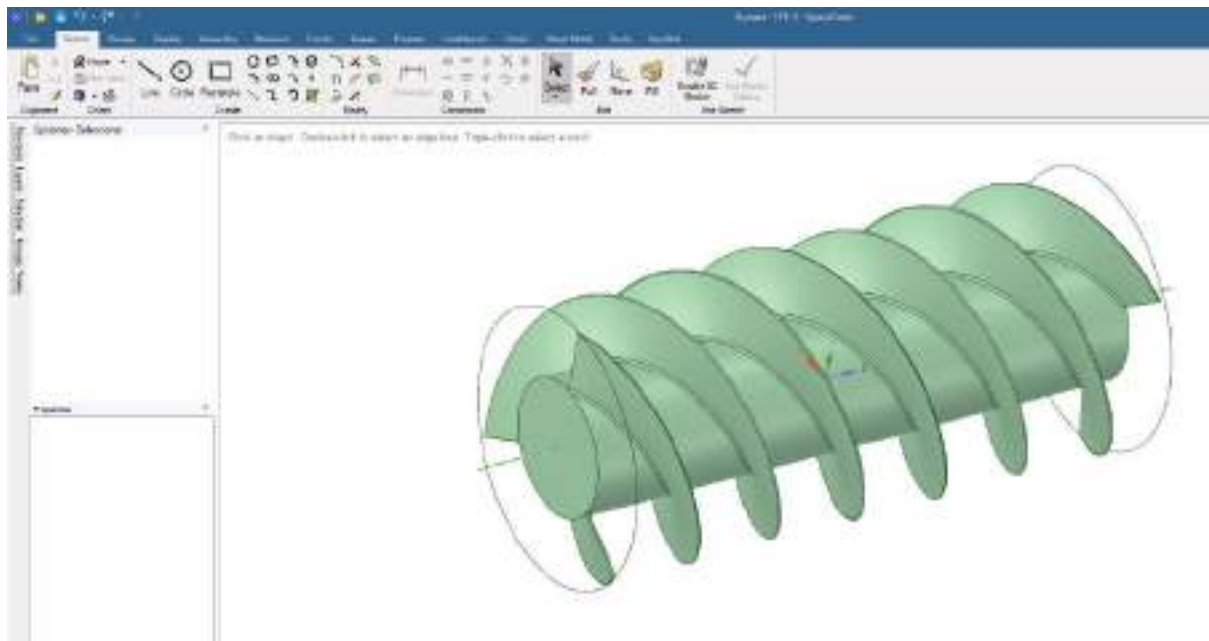


Figura B.1: Geometría de tornillo en Ansys

Cabe destacar que Ansys es un programa de simulación que utiliza modelos negativos por lo que se debe crear la región en la que se moverá el fluido para establecer las condiciones de contorno del problema. Para ello, en la pestaña de geometría se crea un cilindro envolvente a la hélice cuyo diámetro sea el diámetro interior de la carcasa y otro cilindro envolvente al anterior cuyo diámetro sea igual al de la carcasa exterior.

Realizando una operación booleana su sustracción entre ambos cilindros creados y entre el cilindro mas pequeño y la hélice se obtuvieron dos regiones: una rotativa en la cual circulará el fluido y otra estatica que será la carcasa exterior del tornillo. También se crea una superficie en el cilindro exterior en forma de semi-circunferencia que representa la entrada de agua, de acuerdo a la altura calculada en el canal de descarga.

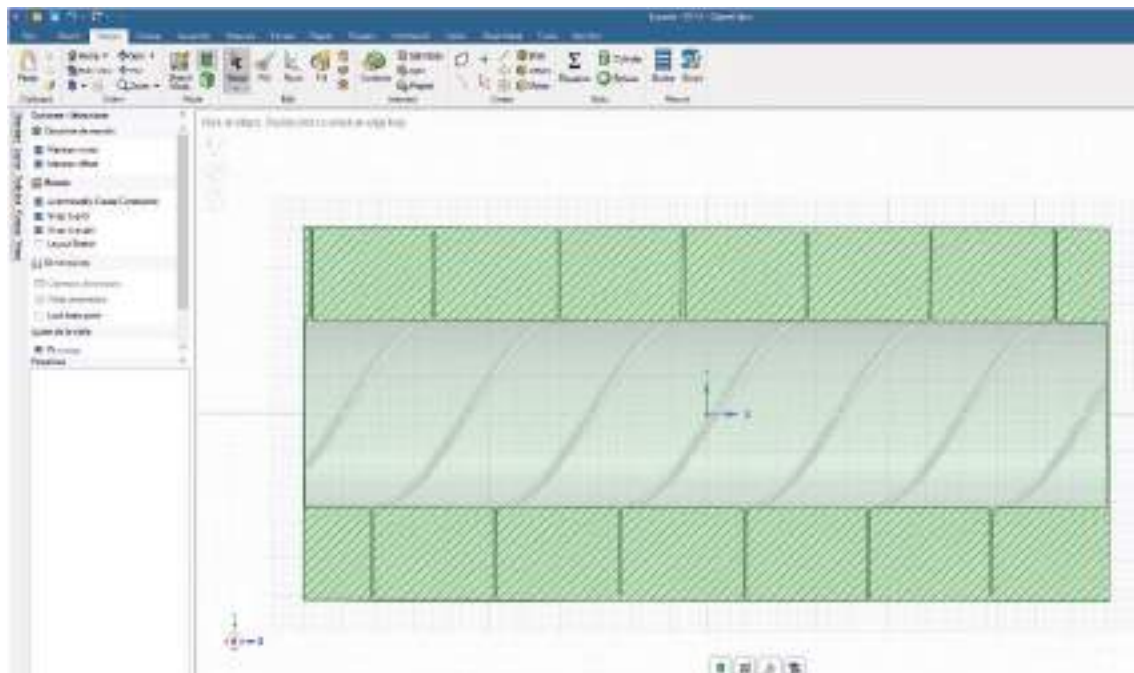


Figura B.2: Corte de región rotativa en Ansys

Se puede ver en la figura B.2 que se crea la región de circulación de fluido, la región libre serán las palas y superficies de la hélice. Luego se procedió a realizar un mallado de toda la geometría.

### B.1.2. Mallado

Esta sección es una de las partes más importantes del proceso de simulación. Debe lograrse una malla que represente lo más preciso posible la geometría real. Será necesario identificar las secciones más importantes en la cual se realiza un refinado para obtener mejores resultados y para definir fácilmente las condiciones de contorno. Principalmente se obtienen 5 regiones o superficies: cuerpo rotor, cuerpo estático, hélice (blade), y las superficies de entrada (inlet) y salida (outlet) como se puede apreciar en la figura B.3

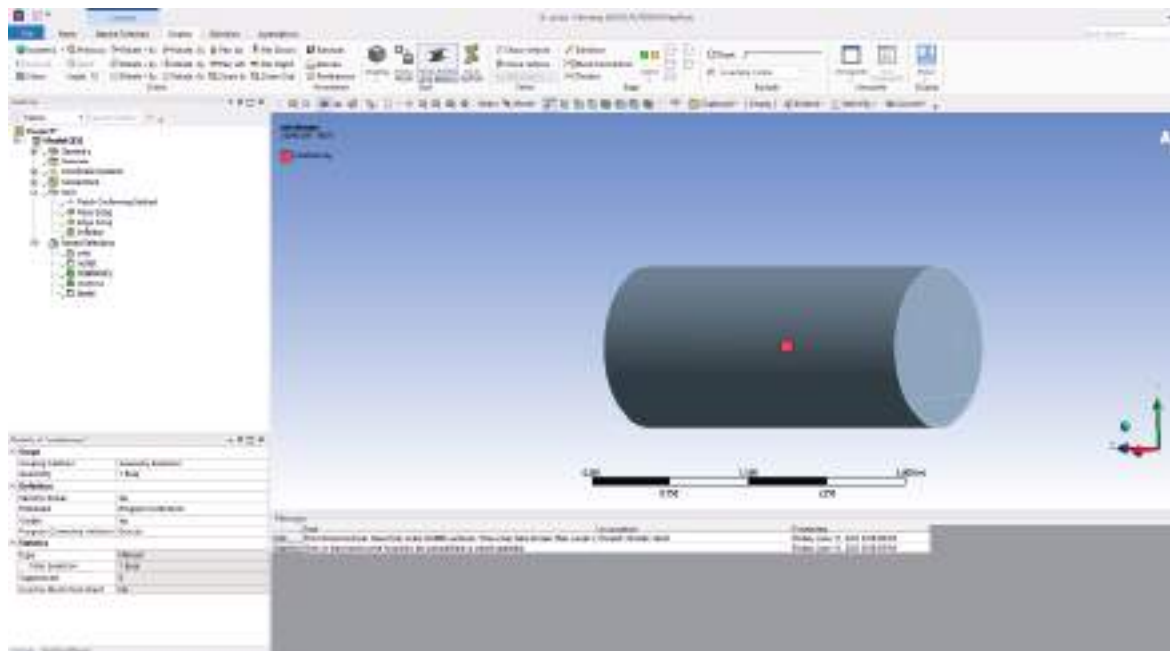


Figura B.3: Regiones de geometría

Una vez identificadas las superficies de interés se procede a realizar un mallado. Se establece un sizing de nodos. El afinamiento de los nodos permite obtener resultados más o menos reales. A menores tamaños, los resultados se acercan más al comportamiento esperado aunque suponen un mayor tiempo de cálculo. Por lo tanto, es importante seleccionar un tamaño que permita obtener resultados fiables sin sobredimensionar de tal manera que sea muy difícil calcular.

En la configuración del mallado se realiza Patch de conformado que realiza un mallado en forma de tetraedros. Para superficies y cuerpos complejos este tipo de nodos permite resultados de alta fiabilidad.

Se estableció el tamaño de estos nodos realizado mediante la opción "Body sizing". en la caras de trabajo de 10 [mm] tanto en la parte estática como rotatoria. Al ser los tamaños del tornillo de metros una aproximación del nodo a 1 [cm] es bastante preciso y se consideró que era suficiente para el cálculo que se pretendió realizar. Se realizó de igual forma para los bordes, estas superficies tienden a ser las más problemáticas a la hora del mallado ya que deben ser lo más finas posibles para evitar zonas de contacto entre los cuerpos y un comportamiento fluidodinámico preciso.

Luego de obtener el tamaño medio deseado de los nodos, se refinó la malla en estas zonas de interés y la mejor forma de hacerlo es mediante la opción "inflation" que permiten añadir varias hileras de nodos del tamaño deseado alrededor de una superficie.

Una vez seteado todo el mallado se genera la malla obteniendo los resultados siguientes:

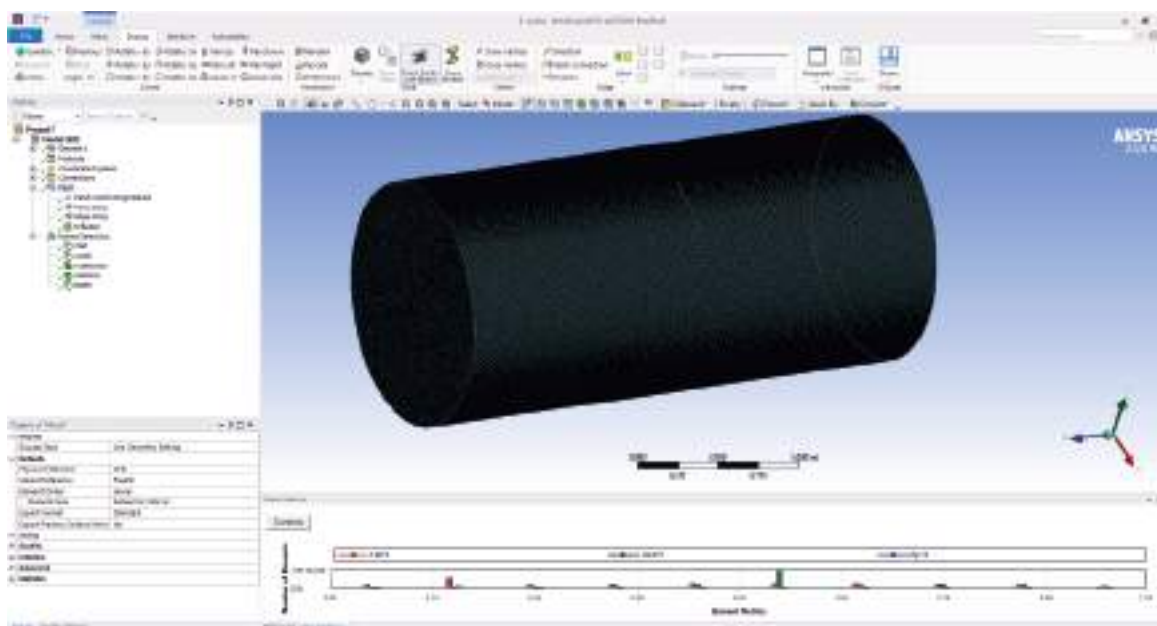


Figura B.4: Malla región exterior

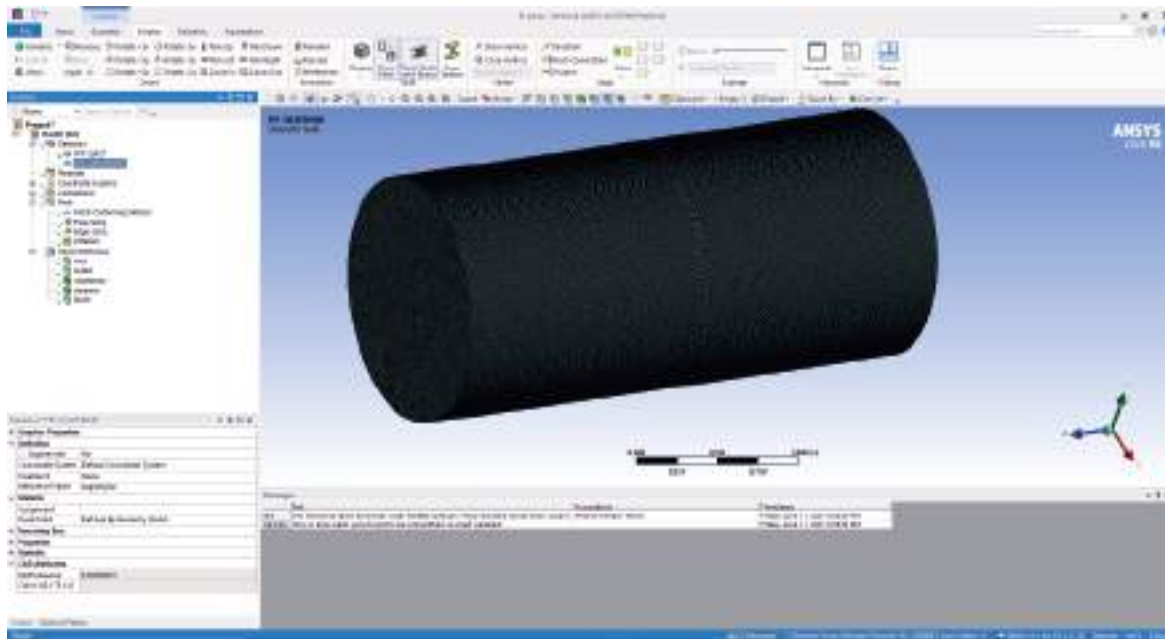


Figura B.5: Malla región interior



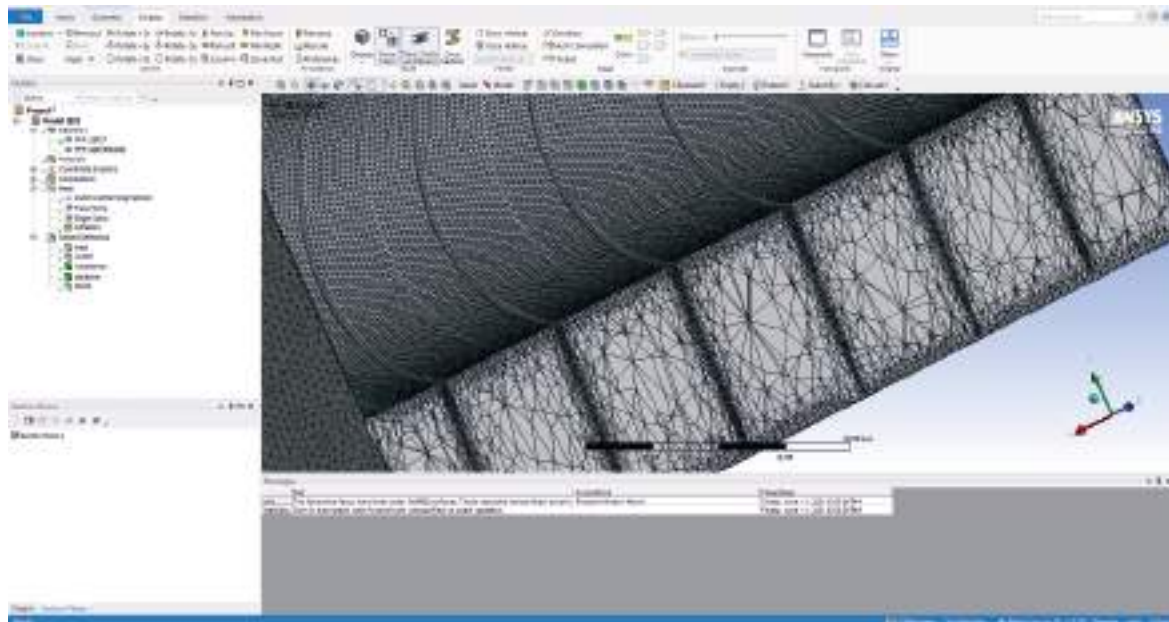


Figura B.6: Seccionamiento de malla (región interior)

Como se vé en las figuras se obtiene una malla bastante precisa a la vista pero antes de poder setear las condiciones de contorno hay que evaluar los parámetros de calidad y que estén dentro de las tolerancias. El mallado final tiene un número total de 1131744 elementos.

### Aspect Ratio

El "Aspect Ratio" hacer referencia a la relación o proporción entre lo ancho y la altura de los nodos. Interesa que la malla tenga un aspect ratio bajo, es decir, que los nodos sean lo más cuadrículados posibles. Normalmente, para fluidos, interesa que este valor sea inferior a 100, aunque valores superiores pueden ser considerados válidos. En el caso del proyecto, el aspect ratio puede considerarse bueno obteniendose una media de 5,88.

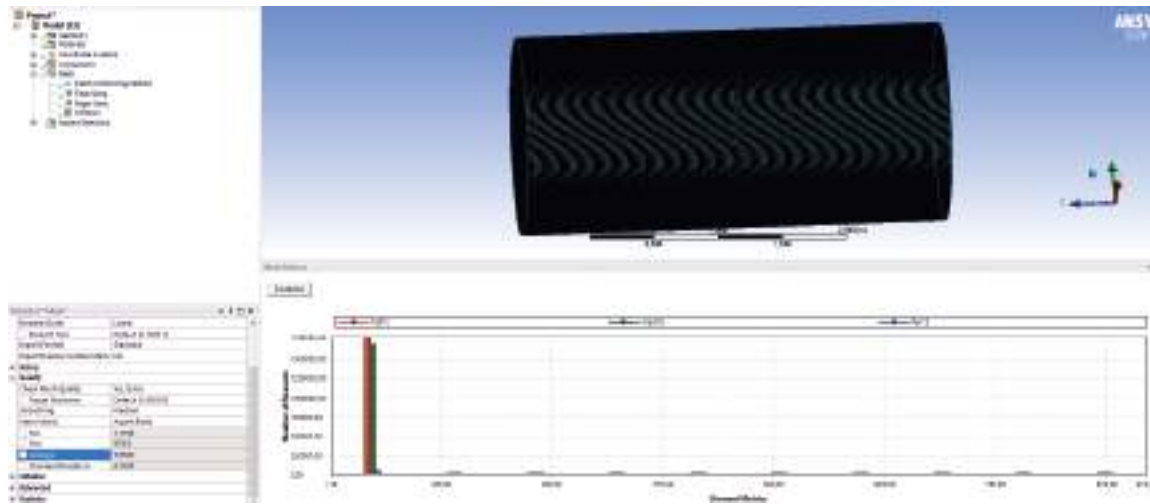


Figura B.7: Parámetro de calidad: aspect ratio

## Skewness

El parámetro "Skewness" da una idea de lo cercano que puede estar del óptimo la cara del nodo. Este valor debe ser lo más cercano de 0. Hay una distribución variada de en los nodos, algunos en la región rotatoria y otros en la estática. Esto indicaría que podría ser necesario un mallado aún más fino en esas superficies en caso que la simulación no llegue a un resultado correcto. Se obtiene una media de aproximadamente 0,00057.

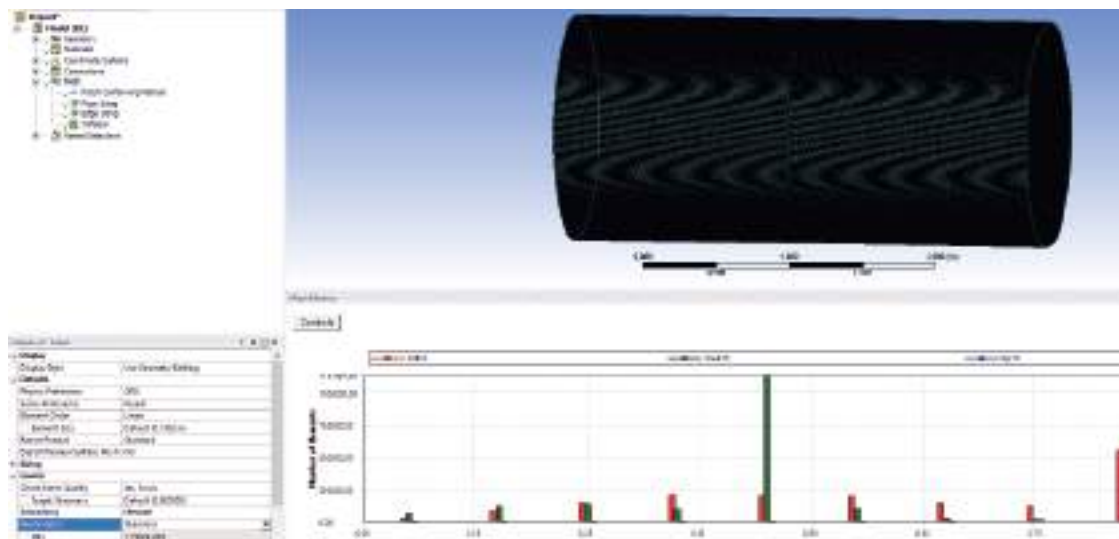


Figura B.8: Parámetro de calidad: skewness

### Orthogonal quality

Otro parámetro interesante a analizar es la Orthogonal Quality que hace referencia a la relación entre el vector normal de una cara, los vectores desde el centro del nodo hasta el centro de los elementos adyacentes y el vector desde el centro del nodo hasta cada cara. Interesa que este valor sea lo más cercano a 1 para que el cálculo entre dos nodos juntos sea más preciso. Si bien se obtiene una media de 0.479, la mayor cantidad de nodos por debajo se encuentran en la superficie estática lo cual podría indicar que es necesario un mayor refinamiento pero puede no llegar a ser necesario.

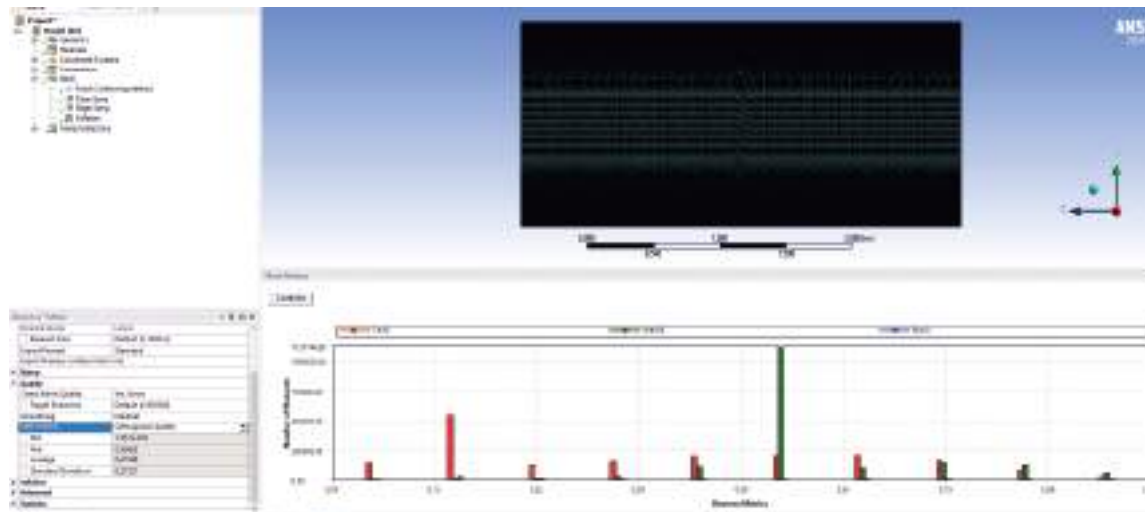


Figura B.9: Parámetro de calidad: orthogonal quality

### B.1.3. Set Up

Para el seteo de las condiciones del problema se utiliza un software dentro de Ansys llamado Fluent. El programa Fluent contiene las amplias características de modelado físico que se necesitan para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales.

Debido a que la finalidad de esta simulación es obtener el material con el cual será más apropiado contruir la turbina, se establece un caso estático pseudo-transitorio ya que se requiere obtener una matriz de presiones en la estructura y este método será suficiente. La simulación pseudo-transitoria es una técnica para el cálculo implícito no lineal de soluciones de estado estable de ecuaciones diferenciales parciales. Matemáticamente, es una homotopía que incrusta el problema del estado estacionario en un entorno de espacio-tiempo utilizado principalmente en aerodinámica. Generalmente se usa para sistemas que tienen soluciones complejas como choques y discontinuidades que no se presentan en las primeras iteraciones como en este caso. El método numérico será apropiado si se quiere resolver el acoplamiento de la velocidad y el campo de presión. Si se quiere obtener

una solución mas precisa de otros parámetros se recomienda realizar una simulación transitoria.

En términos generales, la continuidad pseudo-transitoria es un método predictor-corrector para integración en la que el paso de tiempo se incrementa a medida que avanza la iteración con el objetivo de una convergencia rápida cerca de una solución. La precisión temporal no es el objetivo, pero en la mayoría de los casos el sistema comienza integrándose con precisión en el tiempo, siguiendo de cerca el comportamiento transitorio del solución en las primeras etapas de la iteración hasta que se alcance un estado estable aproximado.

Tras definir que se lanzara el caso en transitorio se crean los dominios existentes. Para este caso habrán dos: Estático y Rotativo. Estos dominios serán de tipo fluido, definiendo un fluido bifásico. Esto quiere decir que el fluido del sistema será tanto agua como aire, ya que se trata de las condiciones de funcionamiento real. También se establece la gravedad.

Se considerará que no existe transferencia de calor para facilitar los cálculos y la turbulencia se calculará mediante k-epsilon tildando la opción "realizable".

En el caso del dominio estático no existe movimiento de éste pero en el rotativo sí hay movimiento del dominio, el cual variará con la inclusión del caudal mediante una subrutina. El caudal entra en el sistema mediante una condición de contorno establecida. Una vez creados ambos dominios deben determinarse los boundaries que son las condiciones de contorno. Para este caso se han determinado los siguientes:

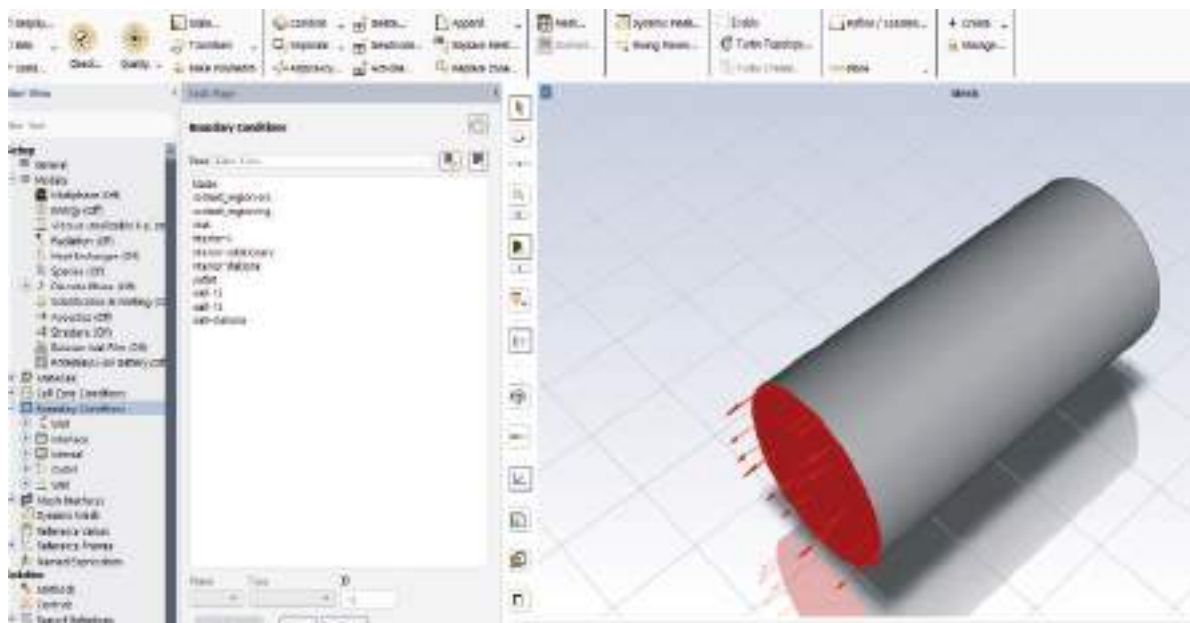


Figura B.10: Setup de Fluent / condiciones de contorno

La entrada del caudal se realiza mediante la superficie Inlet. Este boundary se trata de una entrada caracterizada por un flujo de caudal determinado mediante una variable. Para la salida se ha determinado un Outlet para que se pueda permitir tanto la salida como entrada de masa. La presión relativa a la salida es de 0 Pa.

Por otro lado, se ve como existen tres interfaces. Estas se tratan de interfaces Fluido-Fluido que conectan dos superficies pertenecientes a diferentes cuerpos (rotationary y stationary). El resto de componentes, donde se incluye el rotationary (conjunto de palas y el eje) se tratan de Walls, es decir, paredes sin deslizamiento para simular los diferentes componentes del sistema. Estas paredes deben tener la condición de no deslizamiento para que sean tomadas como tal, es decir como paredes donde el fluido no puede atravesar. Como parámetros de control se setea la fuerza y momento para las palas de la turbina.



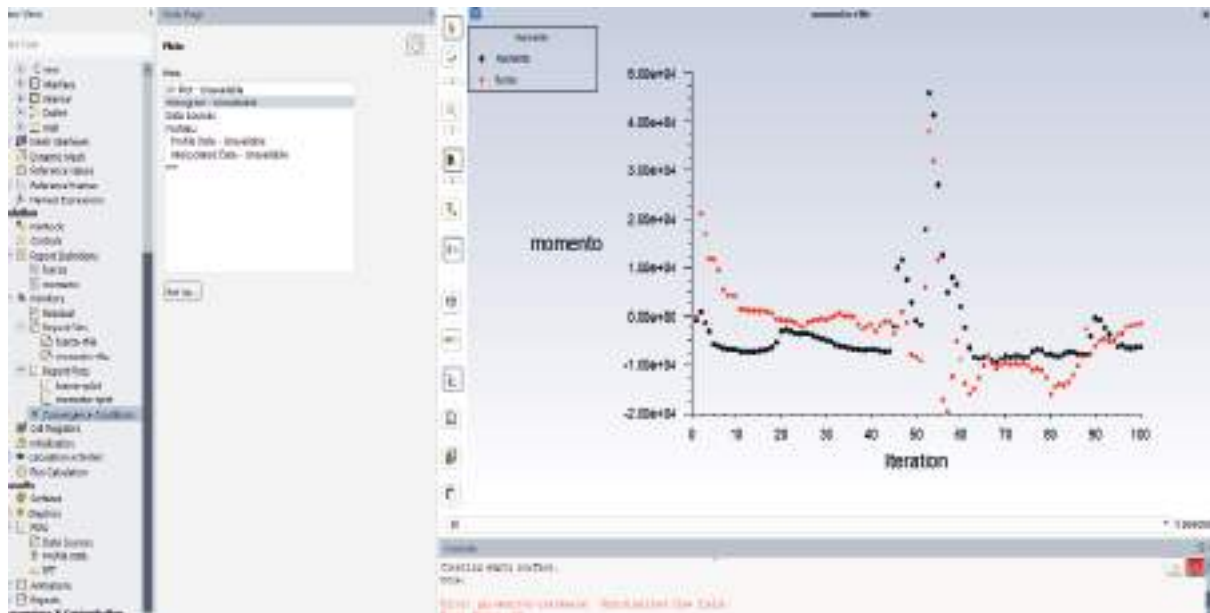


Figura B.12: Resultados de fuerza y momentos en el tornillo

Puede verse en la simulación un pico en los gráficos, se debe a que de acuerdo al time-step seteado corresponde al paso de otra aleta del tornillo generando un golpe en la siguiente aleta. Estos son los datos útiles para obtener una matriz de esfuerzos a lo largo de todo el tornillo como se muestra en el post-procesamiento.

### B.1.5. post-procesamiento

El último apartado es el análisis de resultados, el cuál puede empezarse numéricamente a partir de los parámetros monitorizados durante la fase de cálculo. Aquí se verá el modelo 3D de la turbina con los siguientes datos:

#### Lineas de flujo de fluido

Se establecen 1000 caminos de fluido que se simularán desde el ingreso hasta que salen hacia el canal:



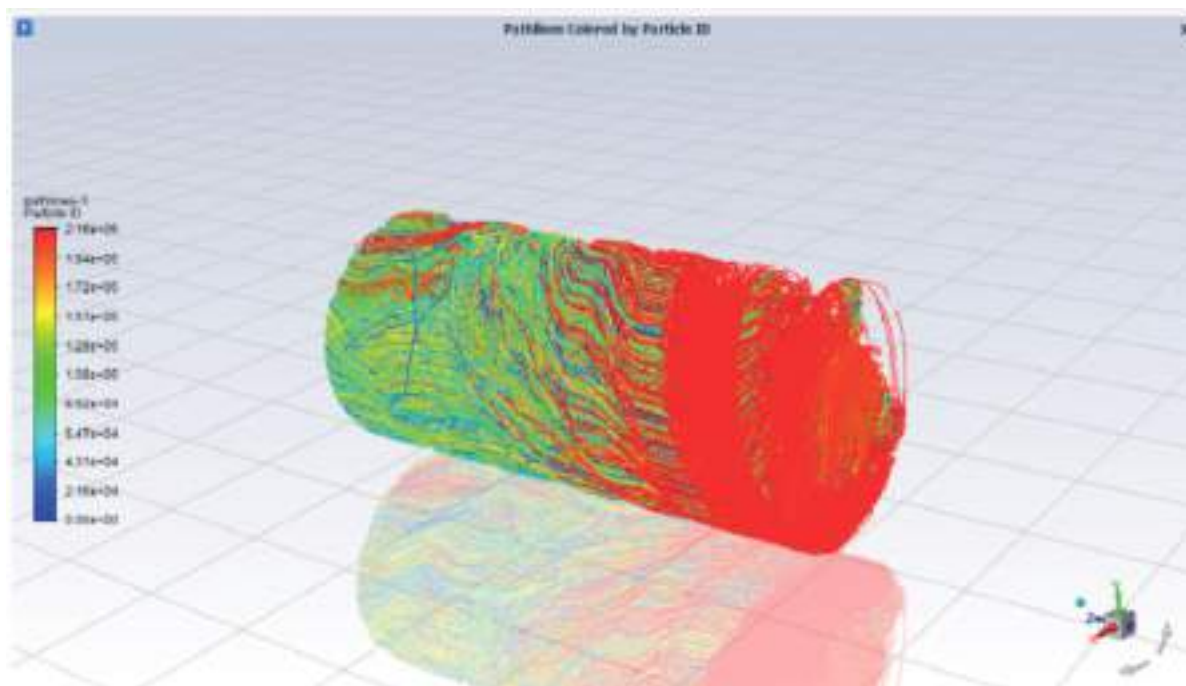


Figura B.13: Vista entrada de flujo de fluido

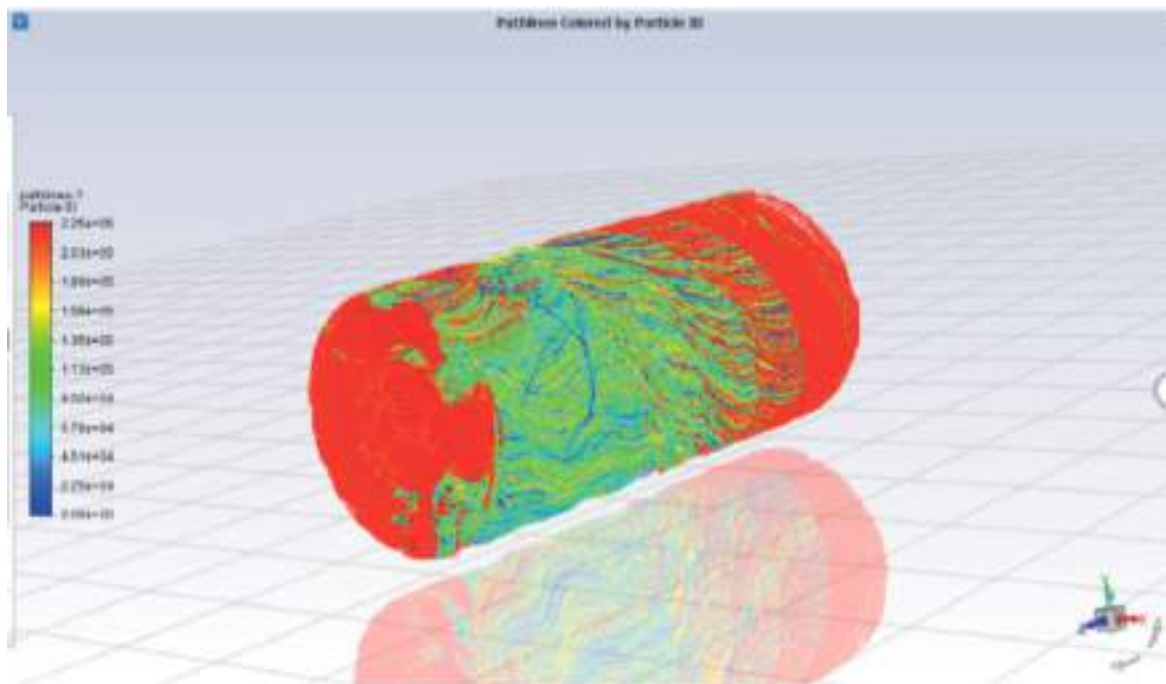


Figura B.14: Vista salida de flujo de fluido

Presión:

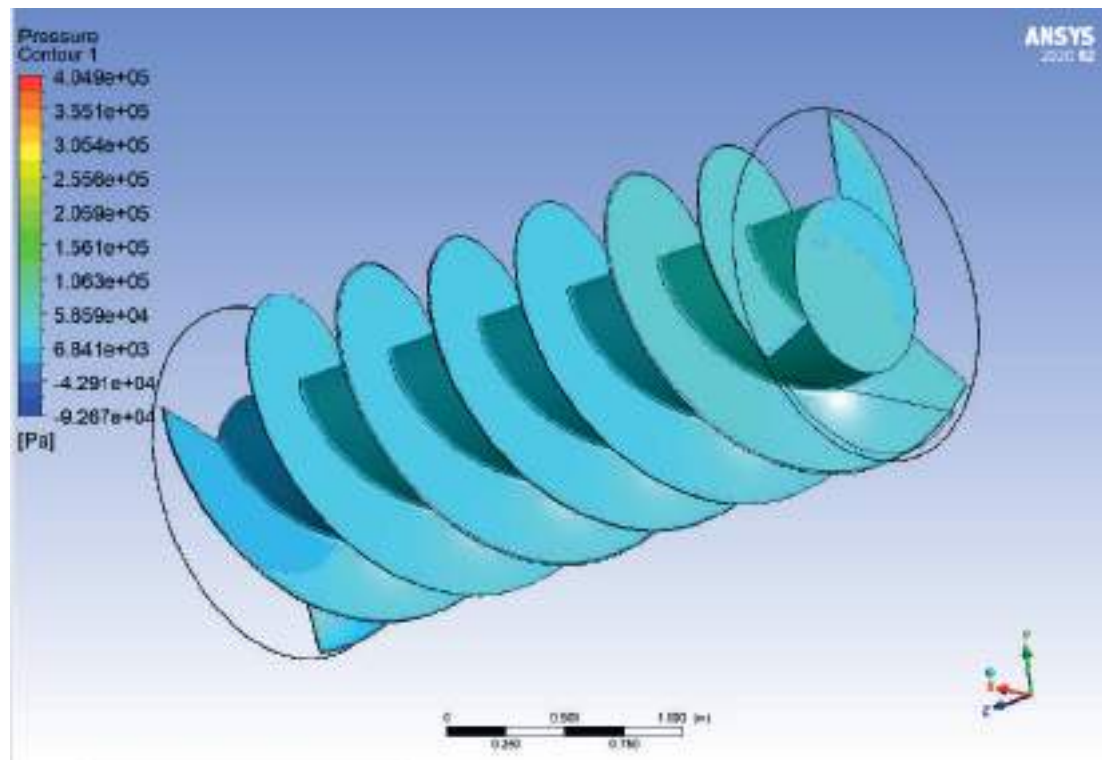


Figura B.15: Presión - vista entrada

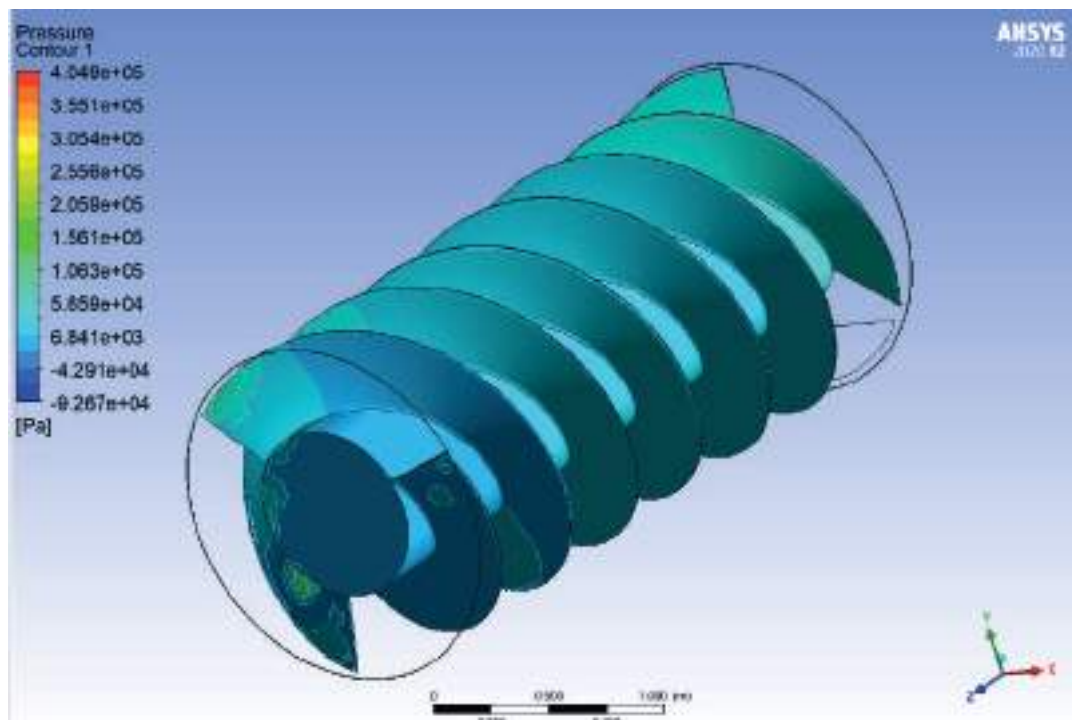


Figura B.16: Presión - vista salida

Áreas de velocidad:

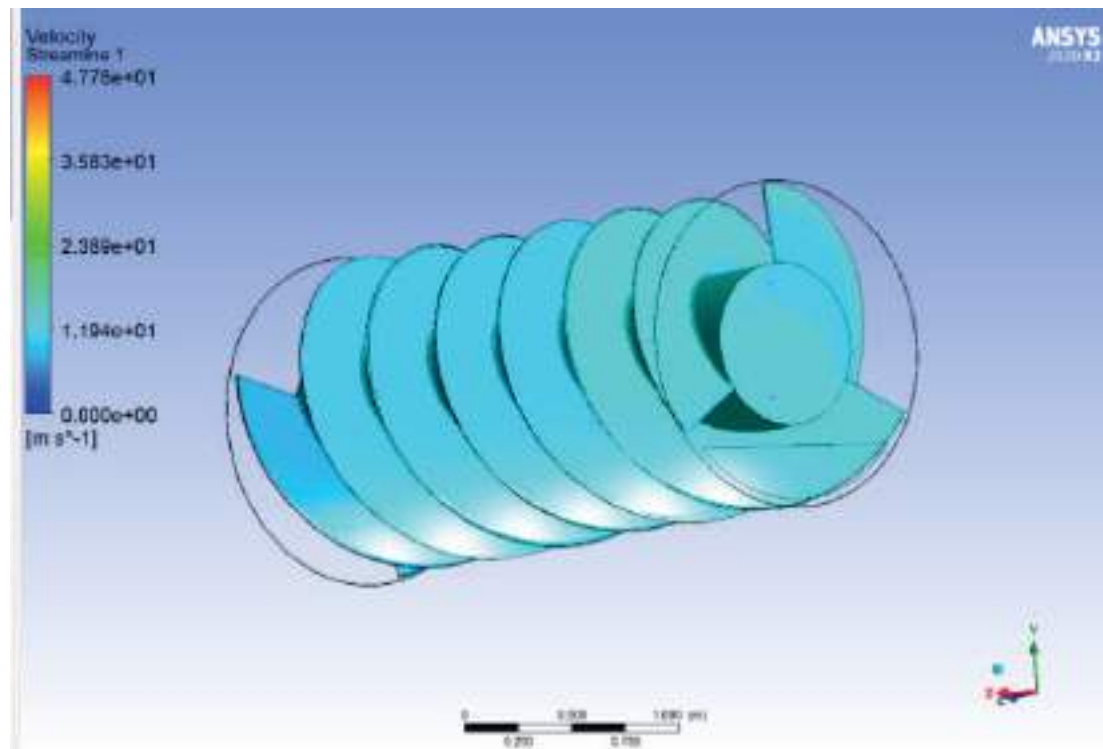


Figura B.17: Velocidad - vista entrada

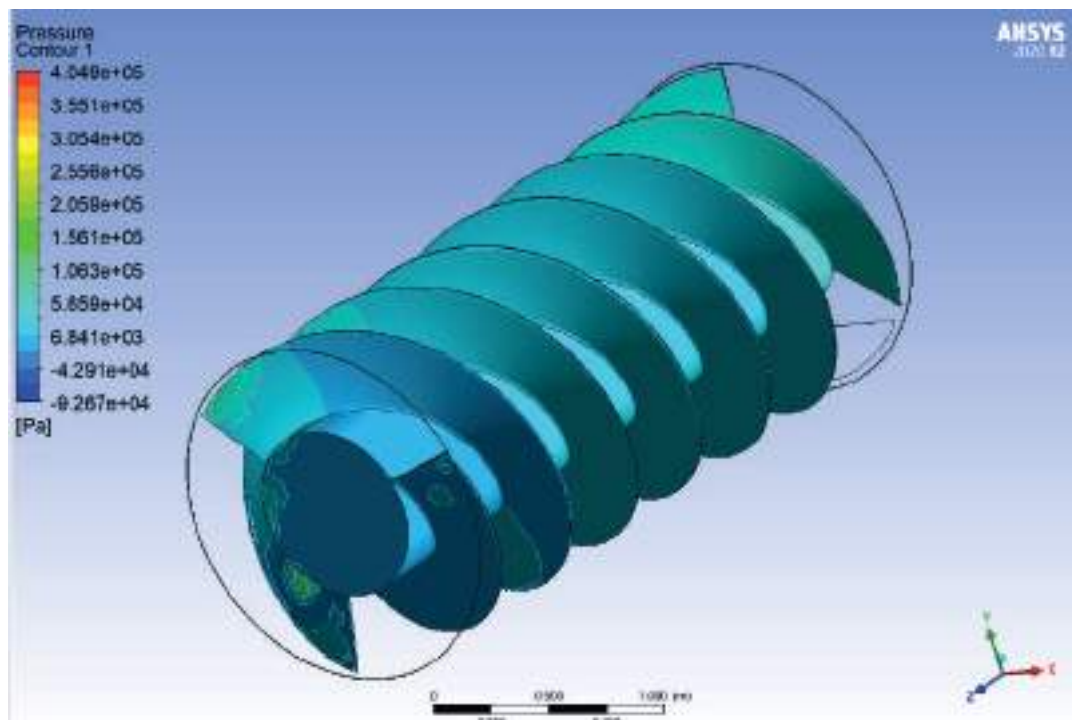


Figura B.18: Velocidad - vista salida

Fuerza en eje z:

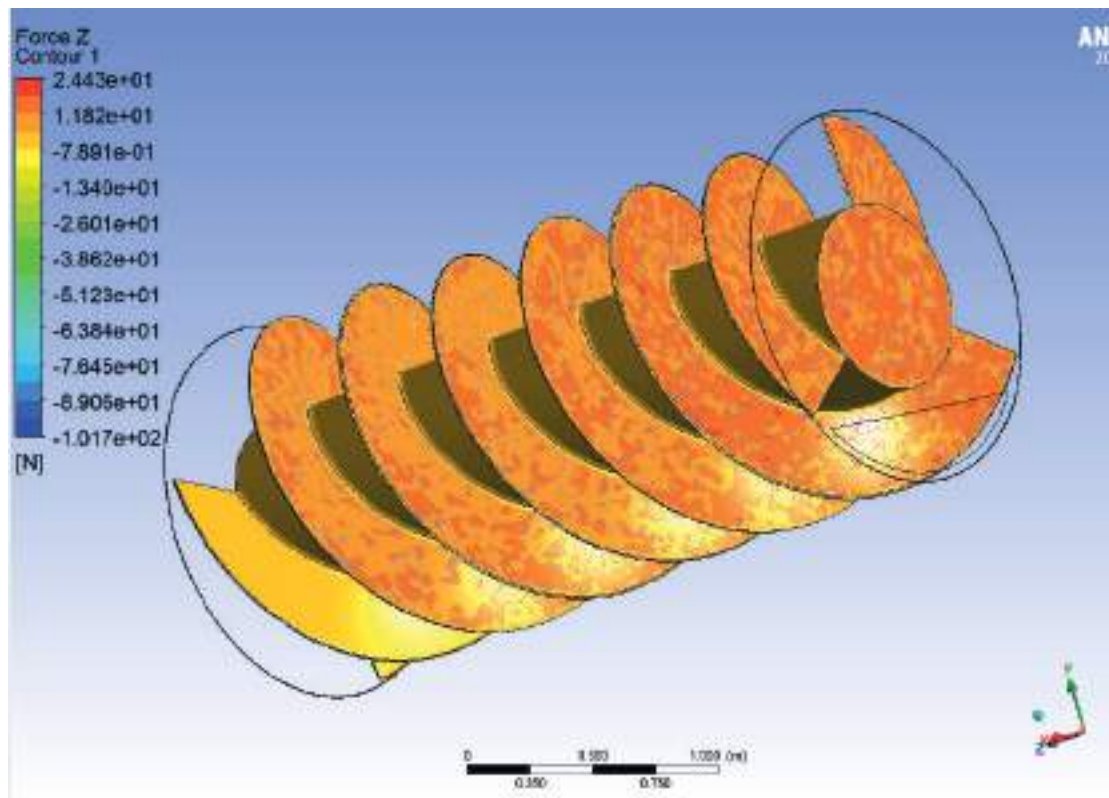


Figura B.19: fuerza en Z - vista entrada

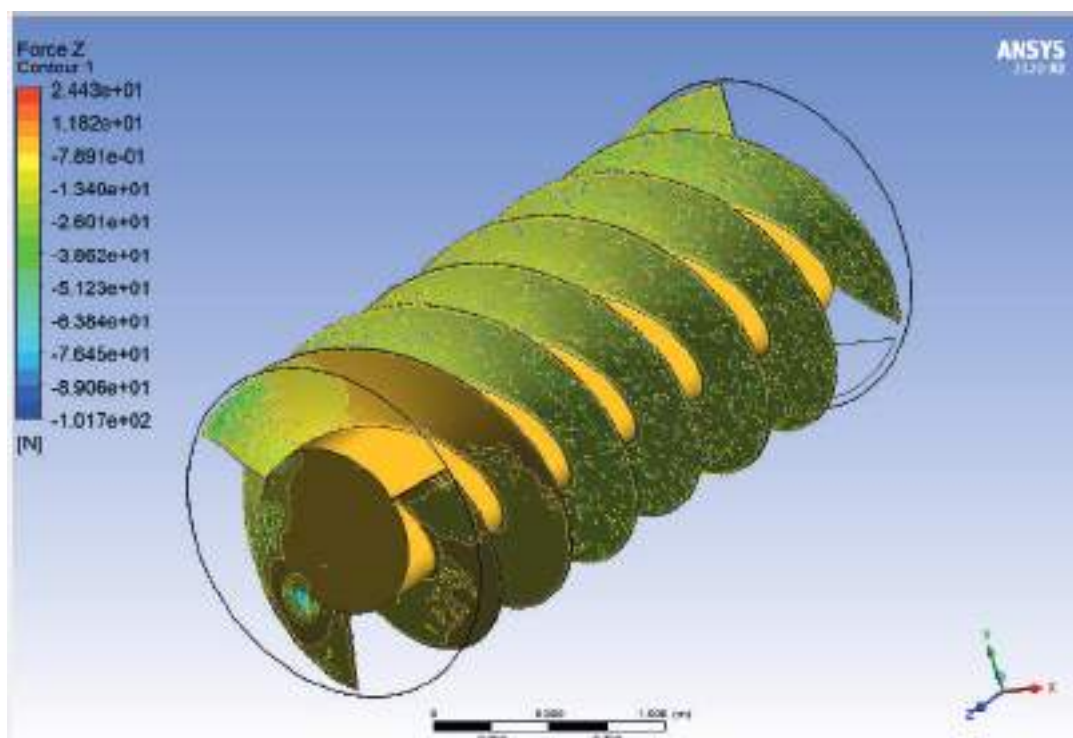


Figura B.20: fuerza en Z - vista salida

Fuerza en eje y:



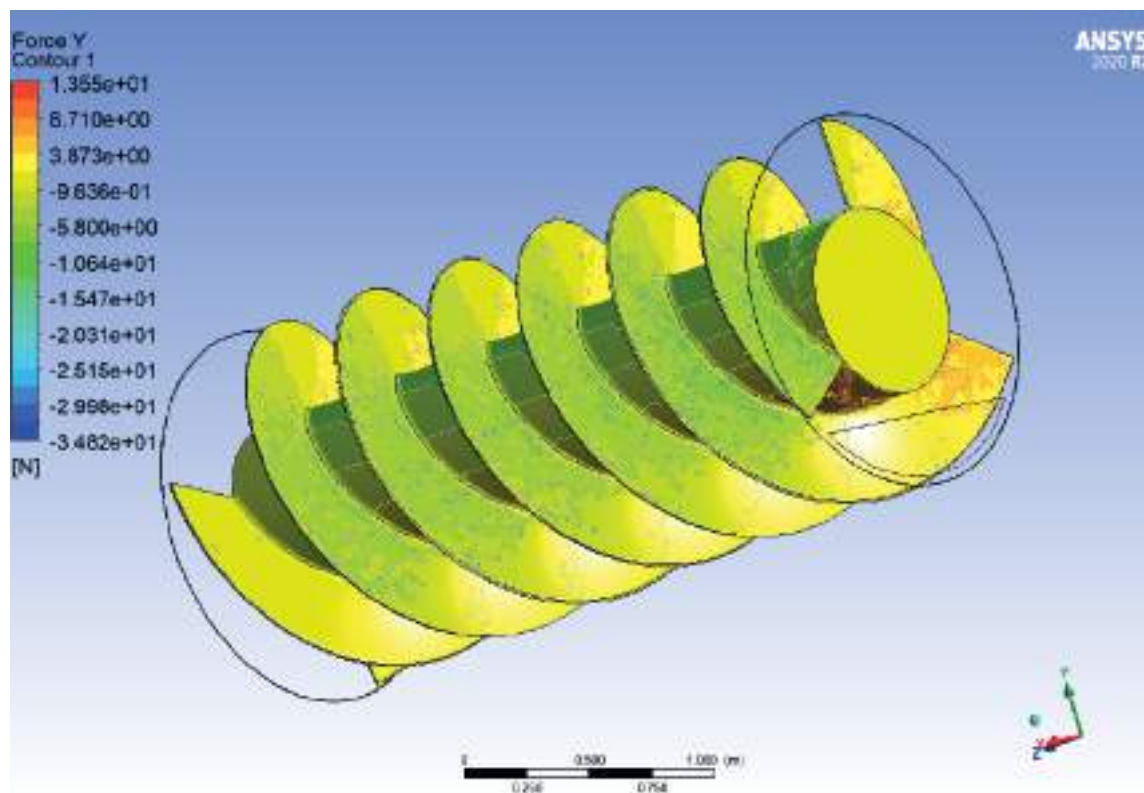


Figura B.21: fuerza en Y - vista entrada

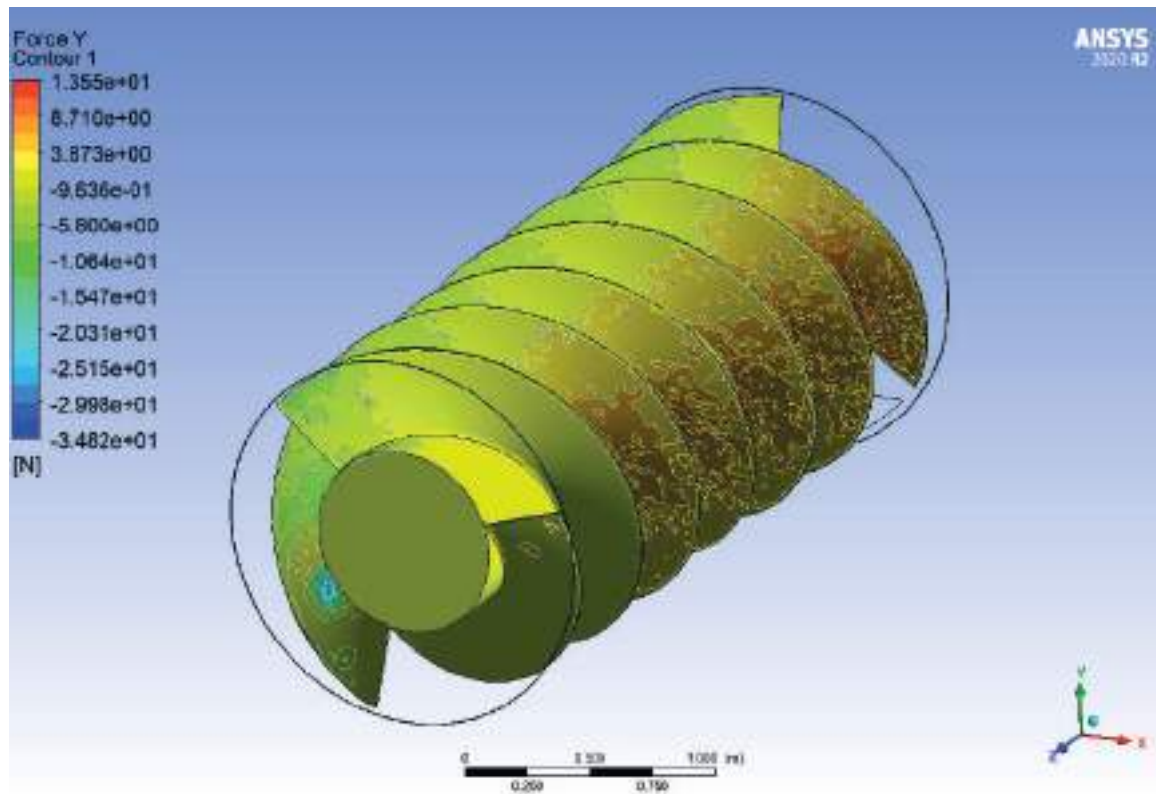


Figura B.22: fuerza en Y - vista salida

Fuerza en eje x:

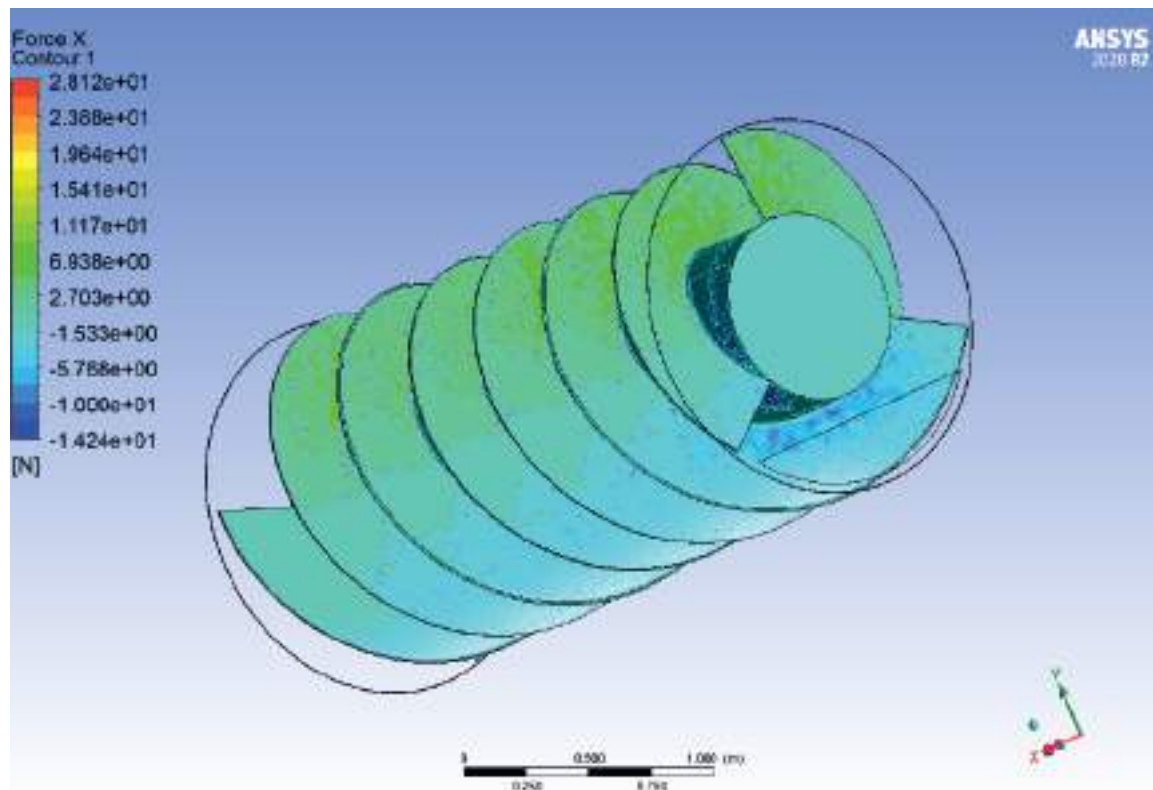


Figura B.23: fuerza en X - vista entrada

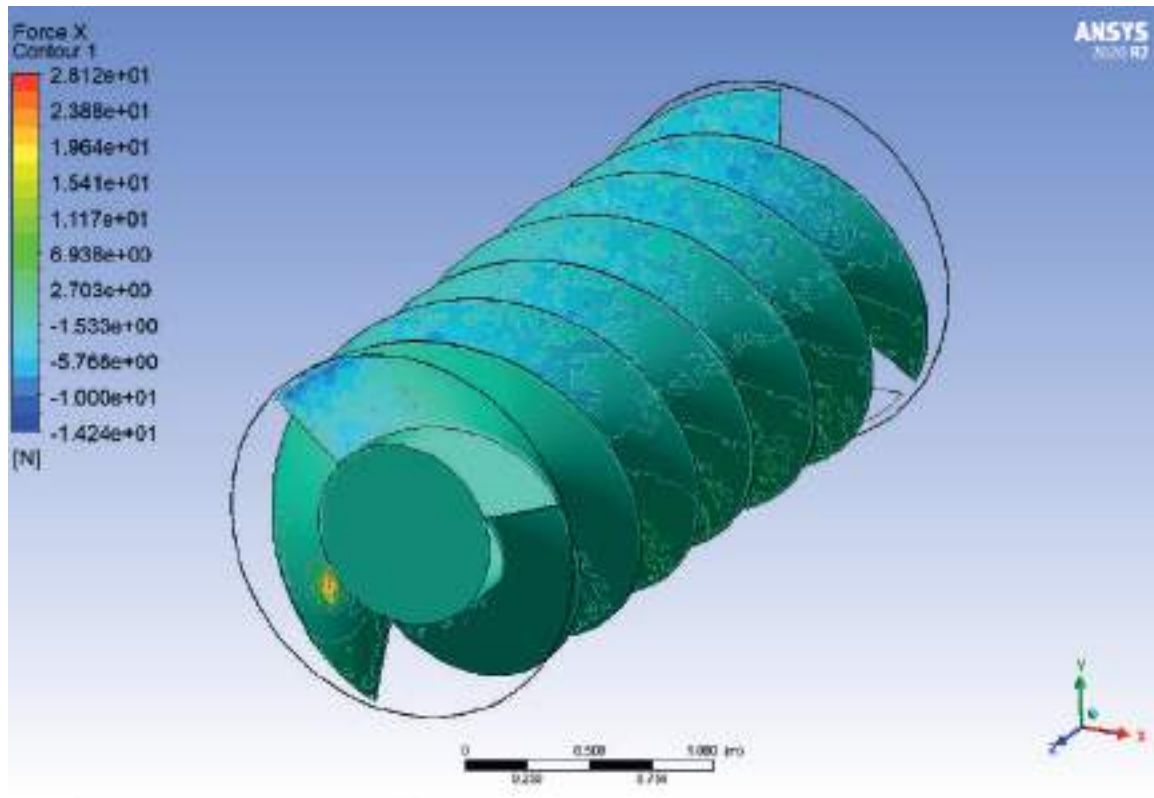


Figura B.24: fuerza en X - vista salida

Fuerza de corte en X:

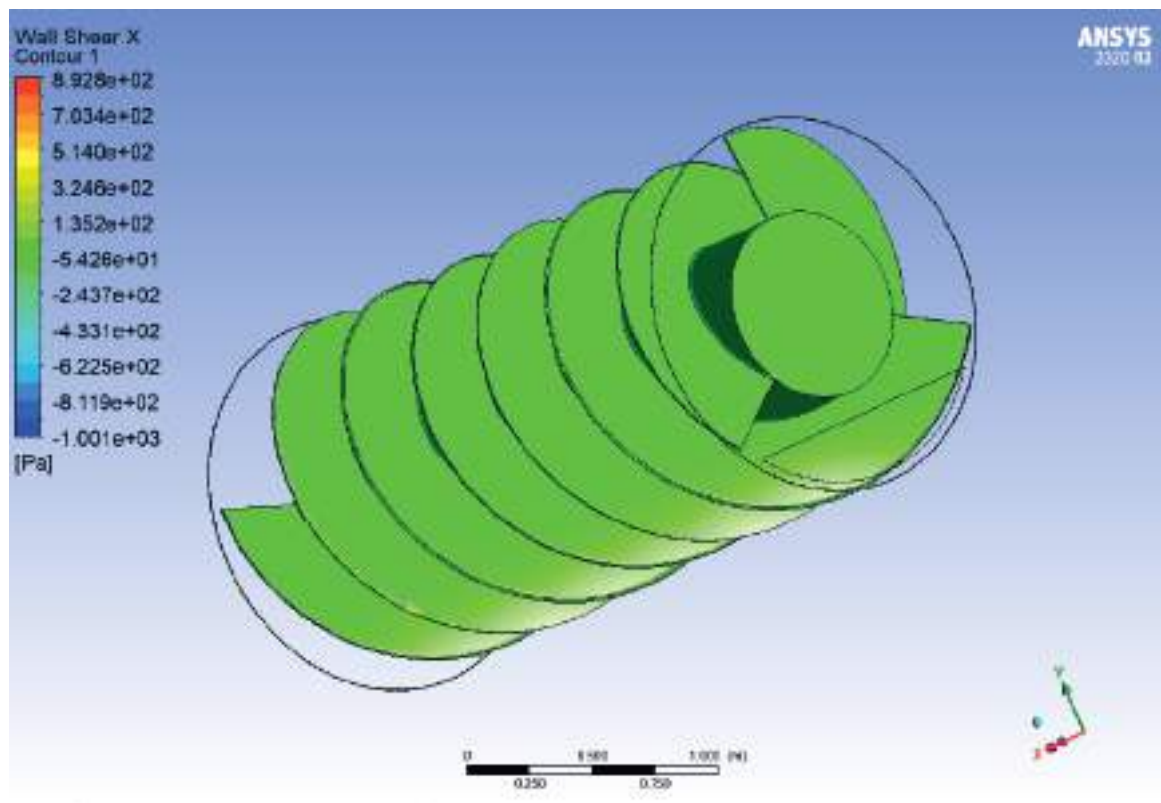


Figura B.25: Fuerza de corte en X - vista entrada

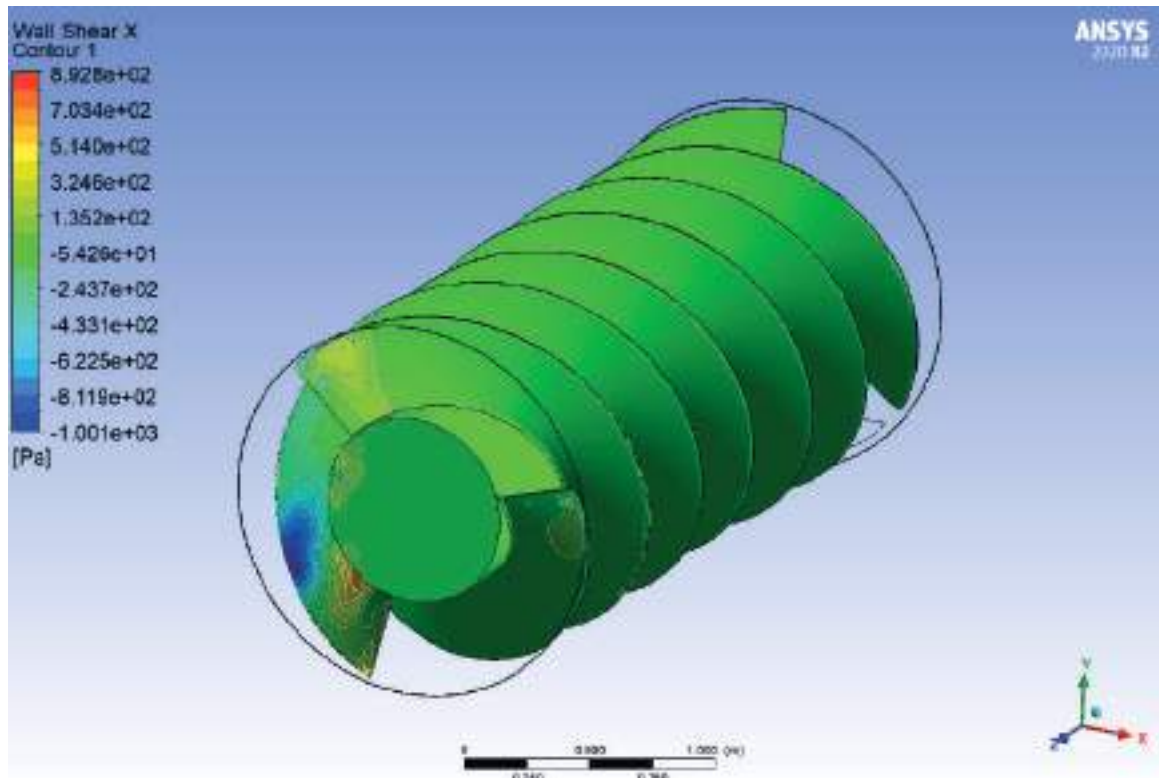


Figura B.26: Fuerza de corte en X - vista salida

Fuerza de corte en Y:

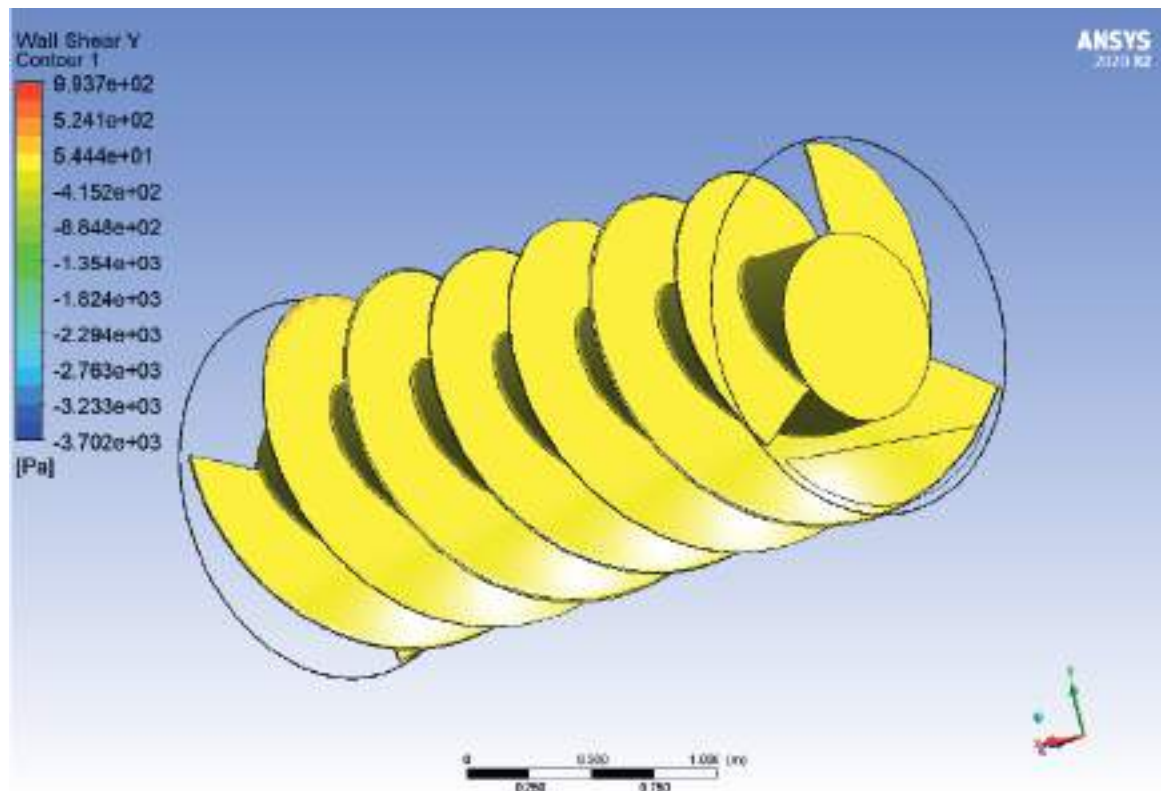


Figura B.27: Fuerza de corte en Y - vista entrada

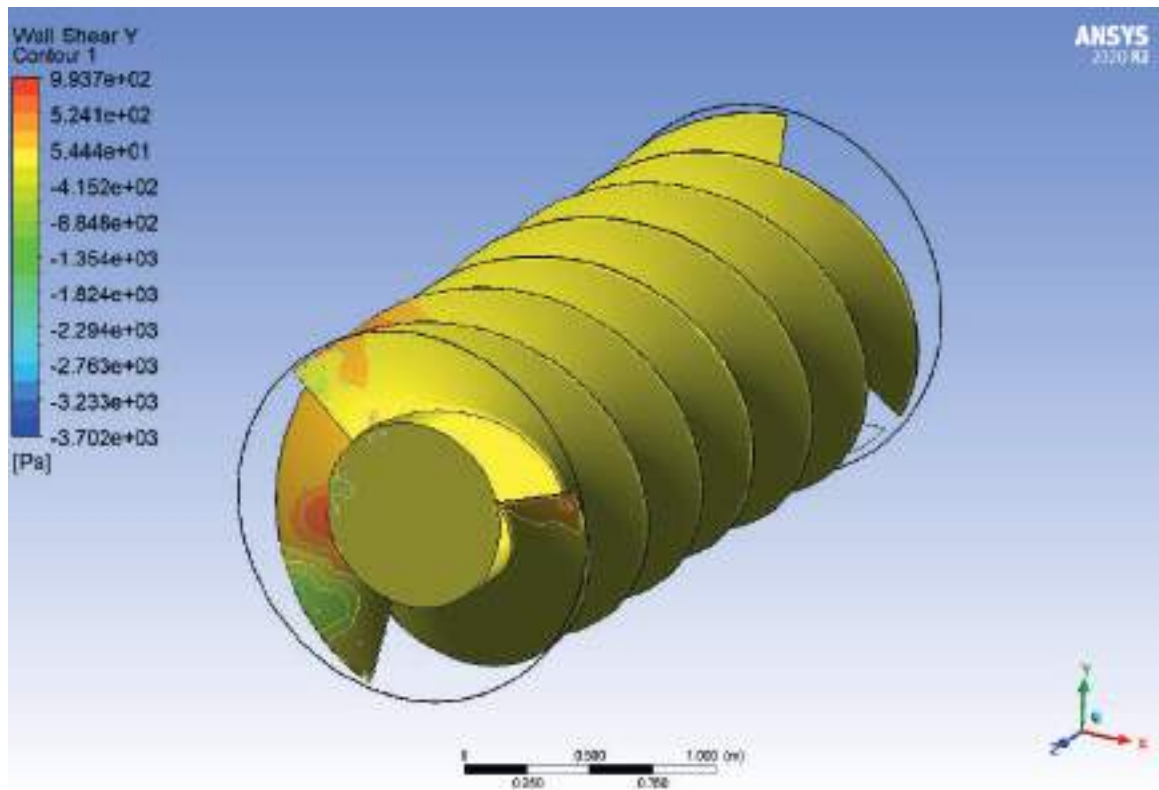


Figura B.28: Fuerza de corte en Y - vista salida

Fuerza de corte en Z:



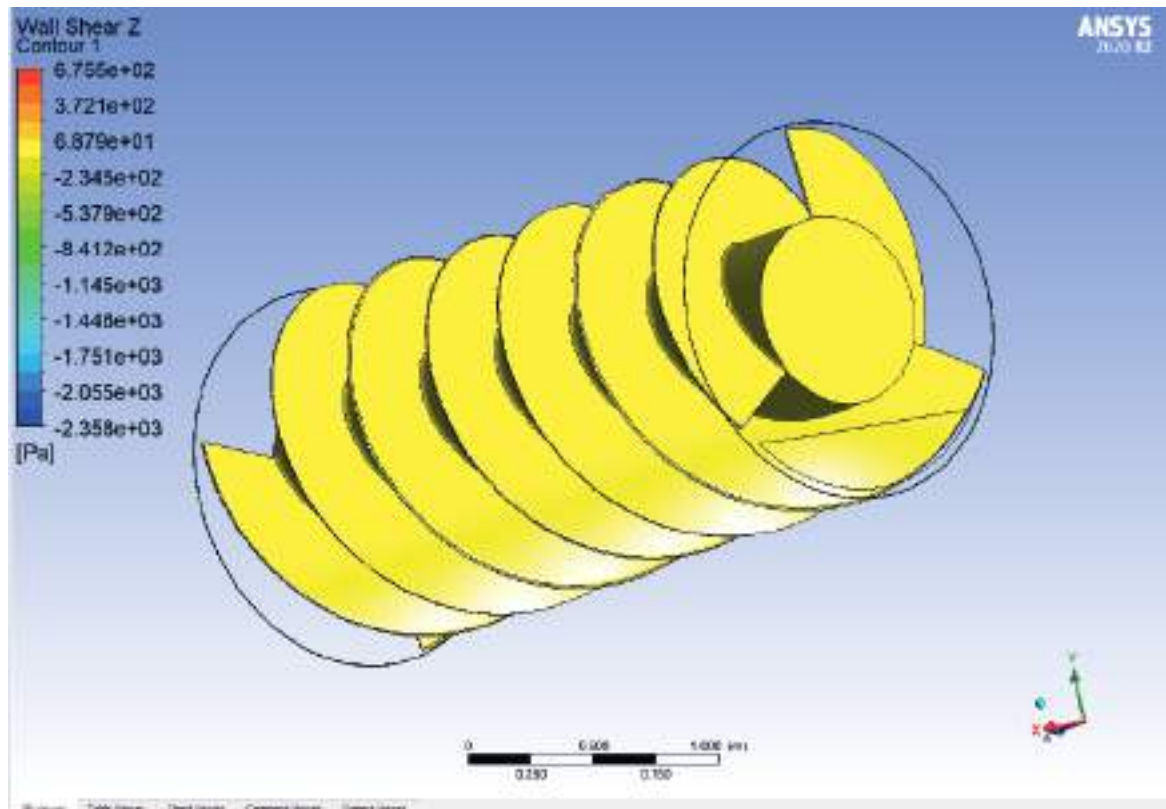


Figura B.29: Fuerza de corte en Z - vista entrada

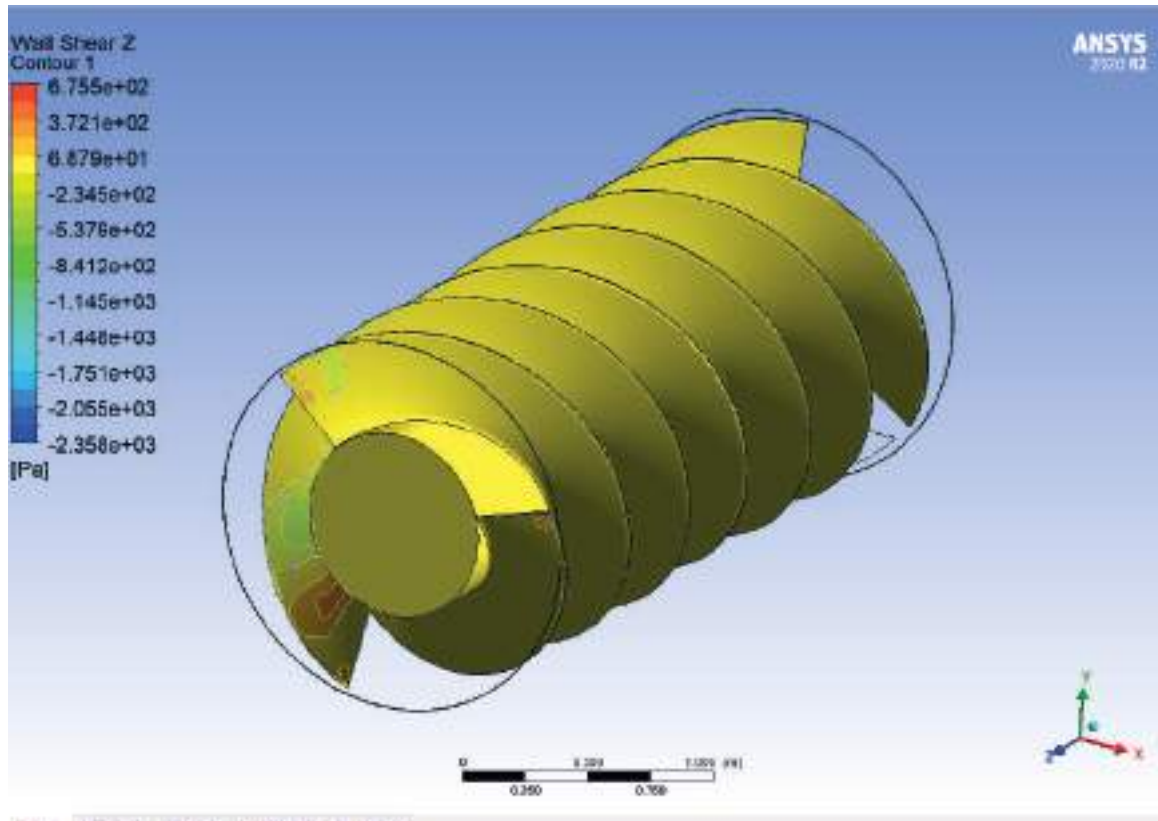


Figura B.30: Fuerza de corte en Z - vista salida

A continuación estas matrices de valores se guardan en archivos de tablas que luego serán volcadas para el análisis estructural estático donde se le asignará un material para evaluar como impacta en cada uno. En la figura B.31 se ven los pasos dentro de Ansys para la evaluación de los materiales:

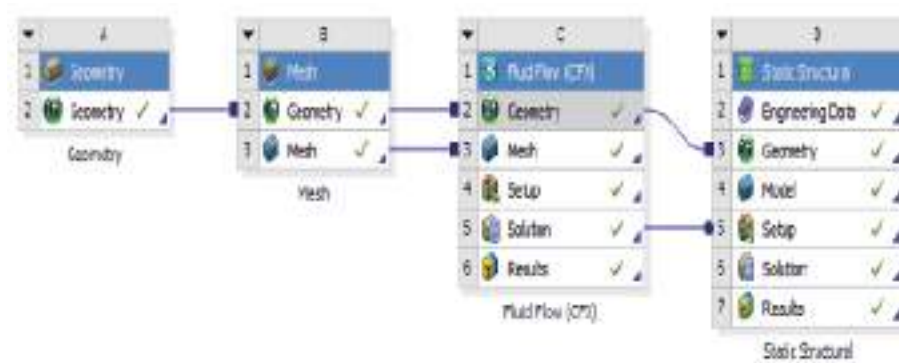


Figura B.31: Módulos utilizados en Ansys Fluent

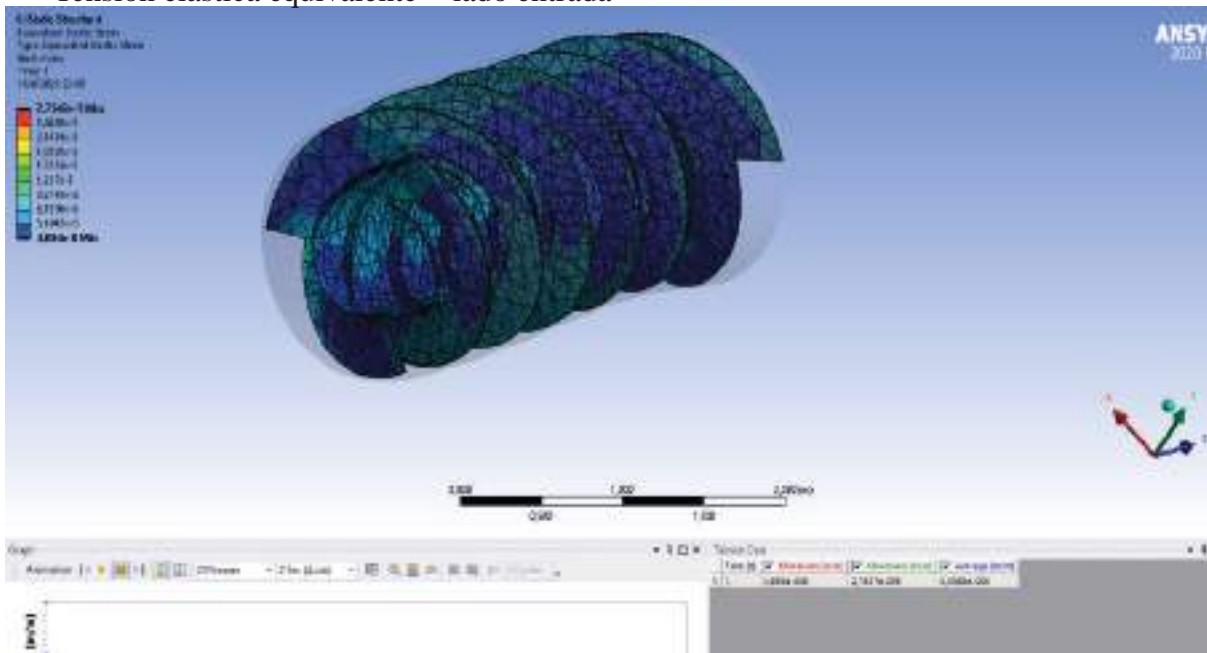
Una vez dentro de "Model" debe cargarse los datos de la simulación ya realizada y se analizará la solución de "Total deformation", "Equivalent Elastic Stress" y "Equivalent stress" para:

- Fibra de carbono
- Resina epoxy
- Resina de polyester
- Compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven
- Poliamida Nylon 6
- Polietileno de alta densidad HDPE
- Epoxy / fibra de carbono woven
- Epoxy E-glass Wet
- Acero estructural

Se obtuvieron los siguientes resultados:

## Fibra de carbono

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

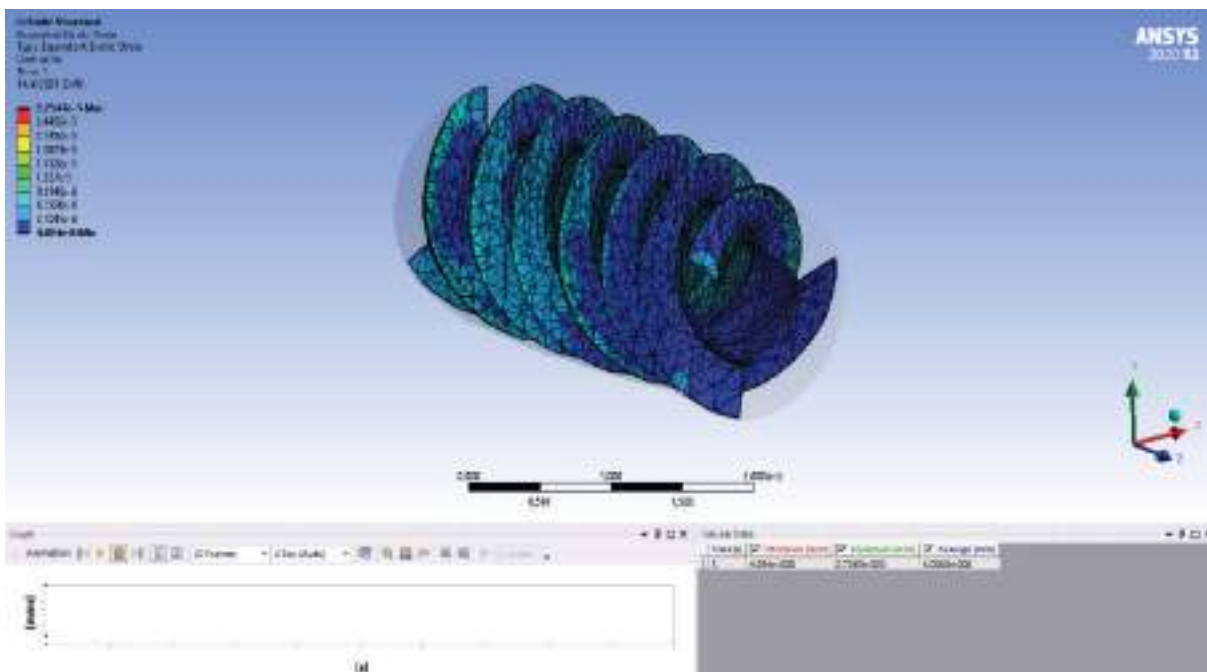
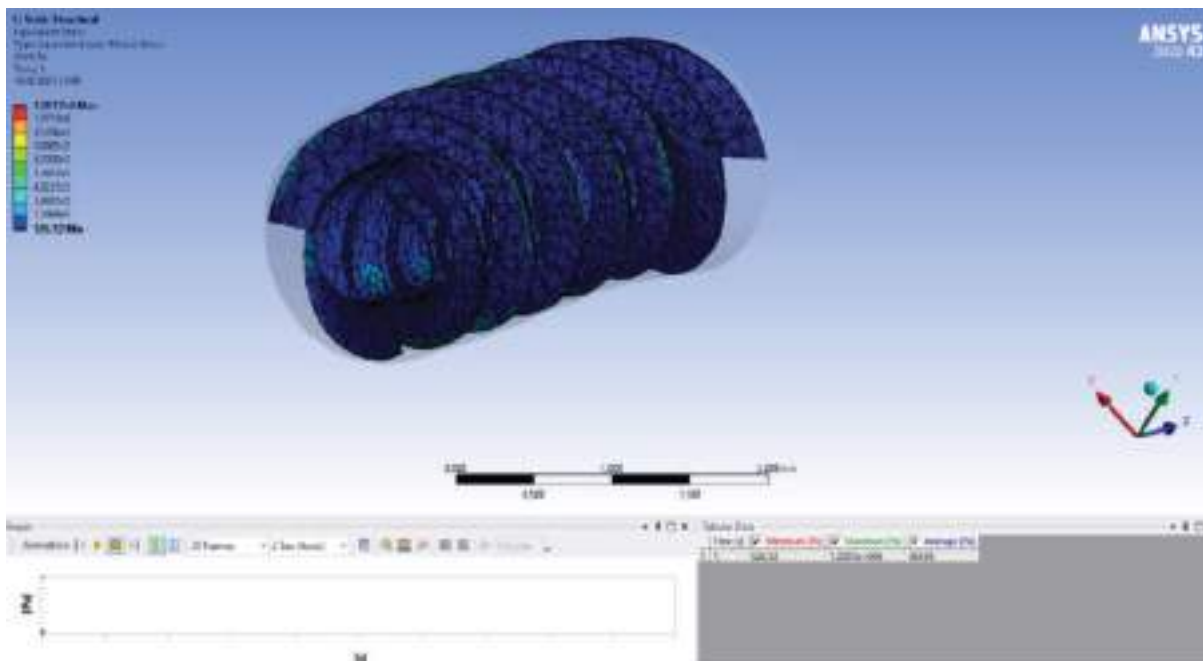


Figura B.32: Tensión elástica equivalente fibra de carbono

Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

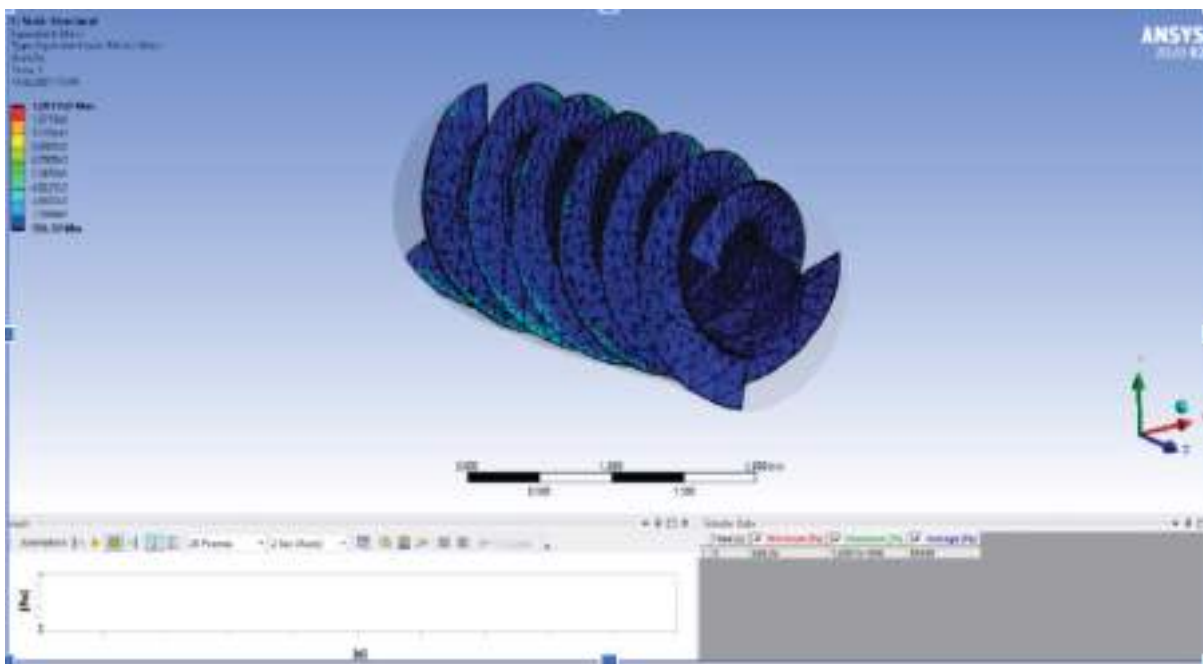
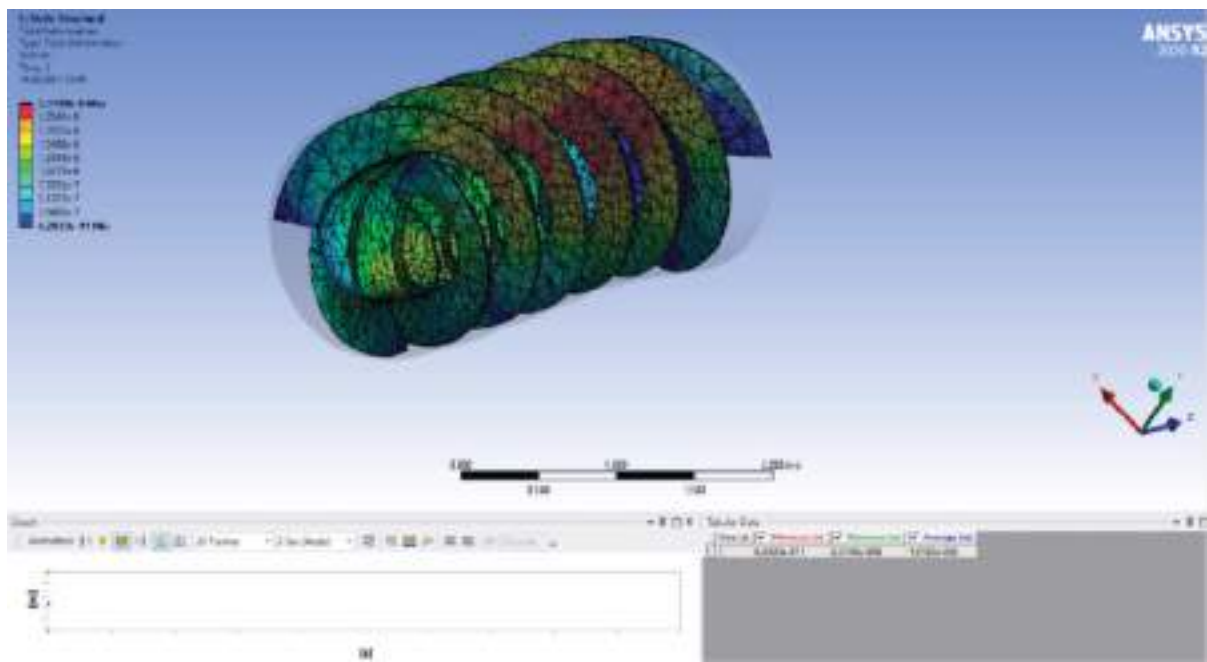


Figura B.33: Tensión equivalente total fibra de carbono

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

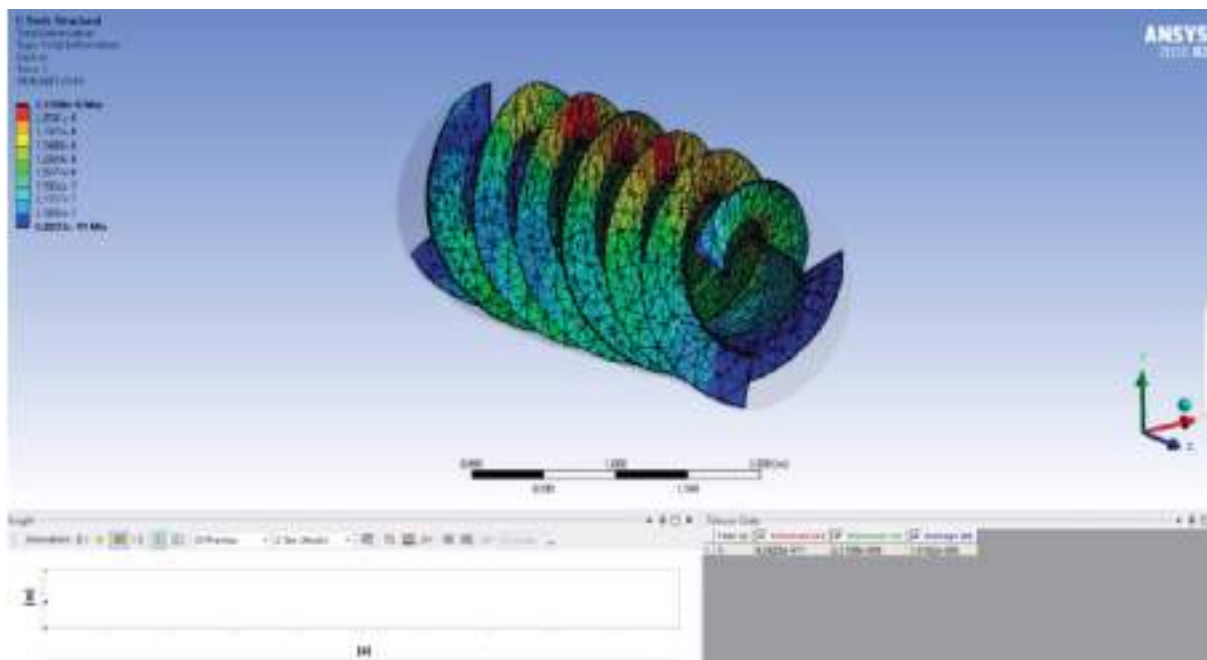
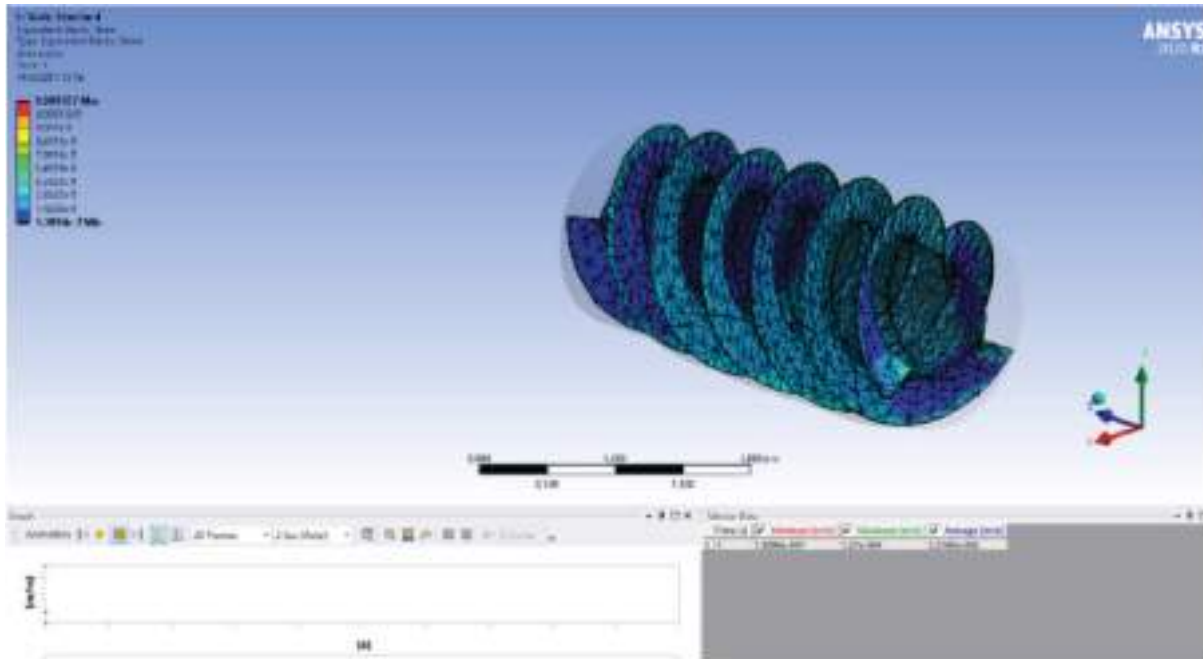


Figura B.34: Deformación total fibra de carbono

**Resina epoxy**

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

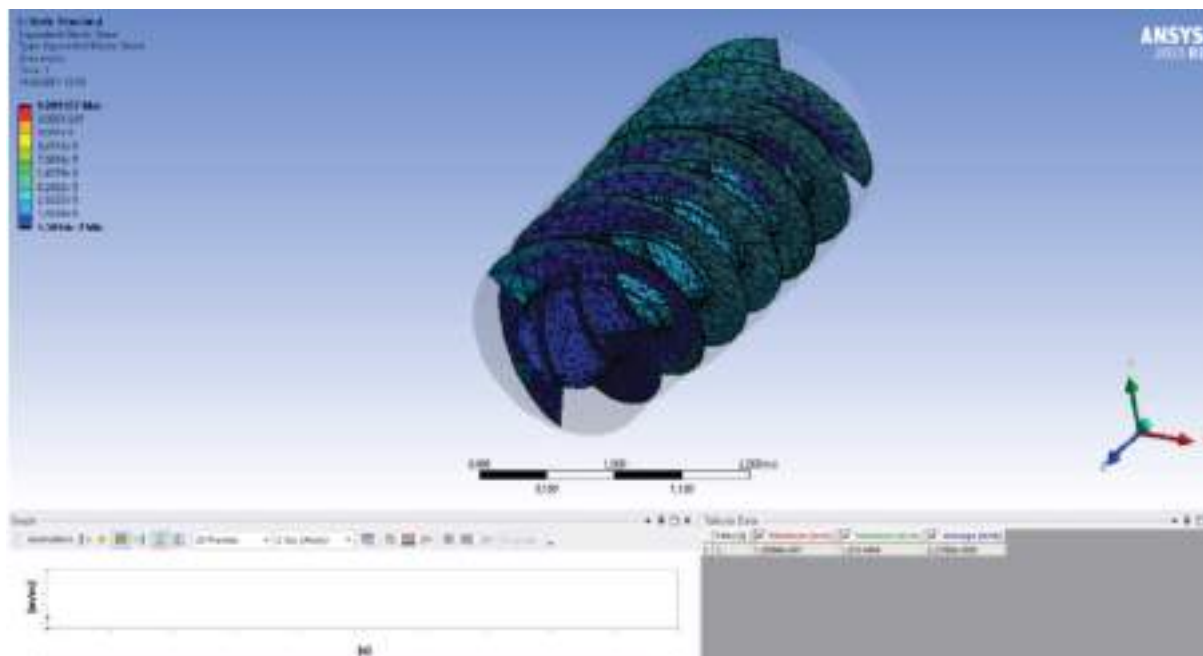
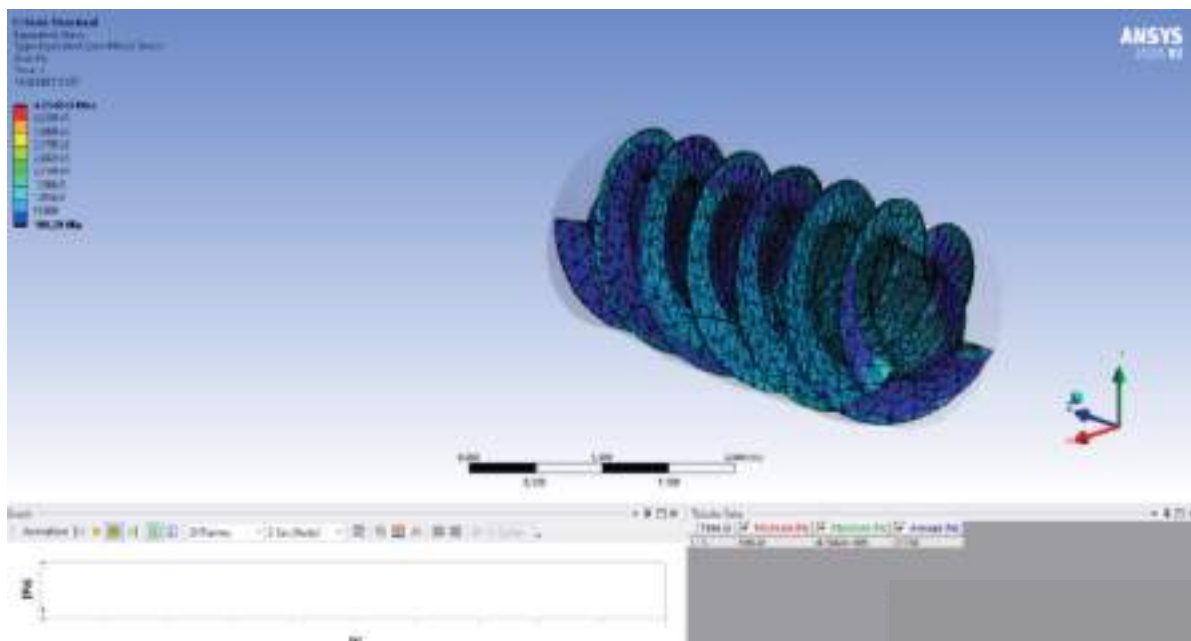


Figura B.35: Tensión elástica equivalente resina epoxy

Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

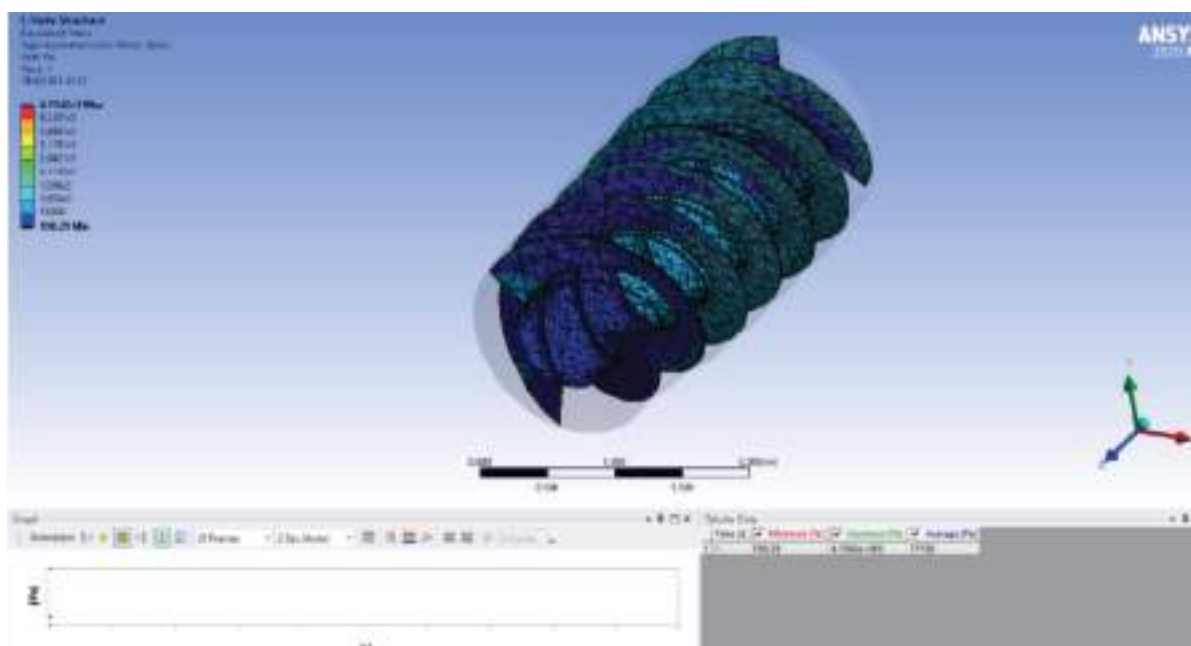
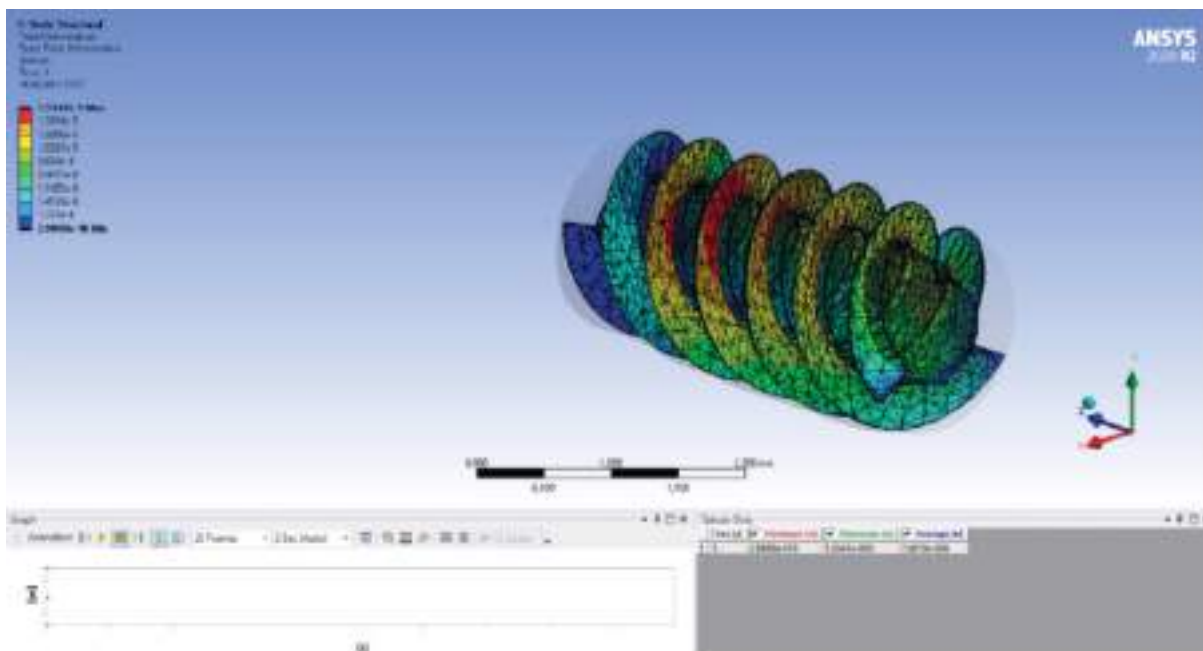


Figura B.36: Tensión equivalente total resina epoxy



Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

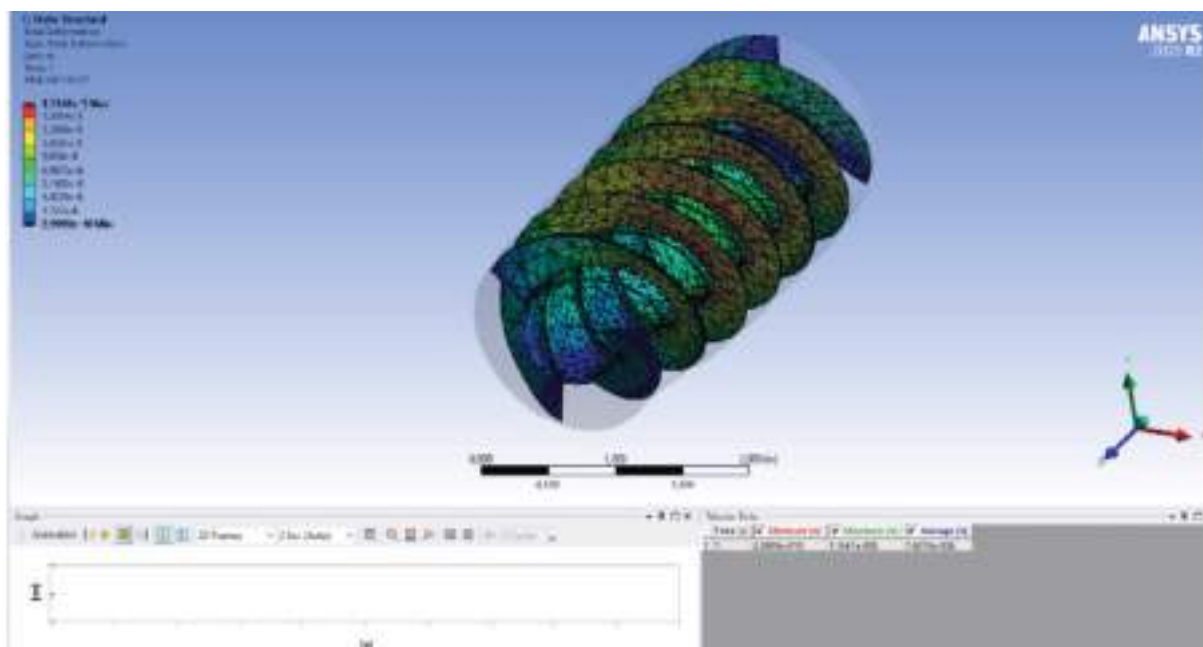
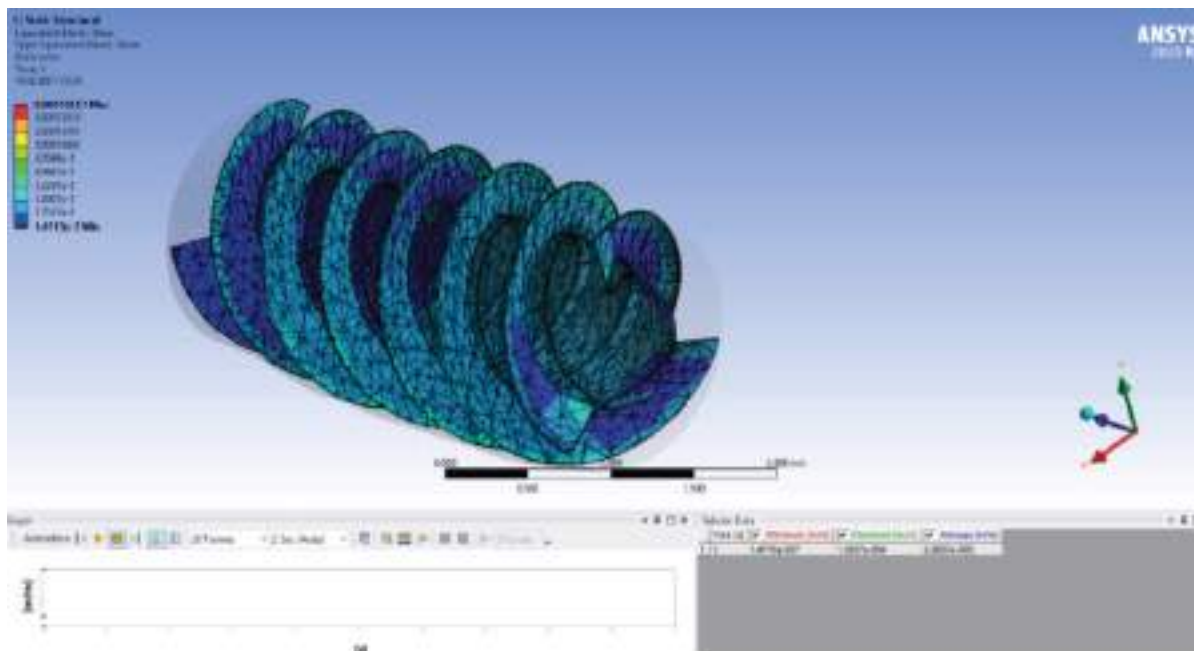


Figura B.37: Deformación total resina epoxy

## Resina polyester

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

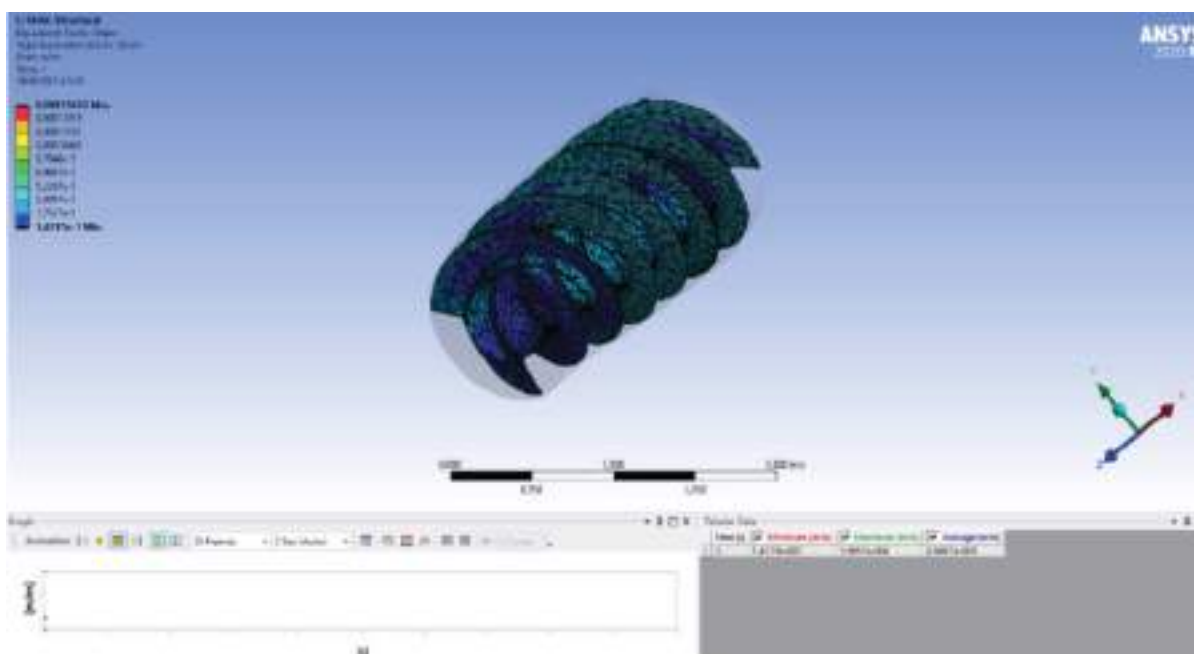
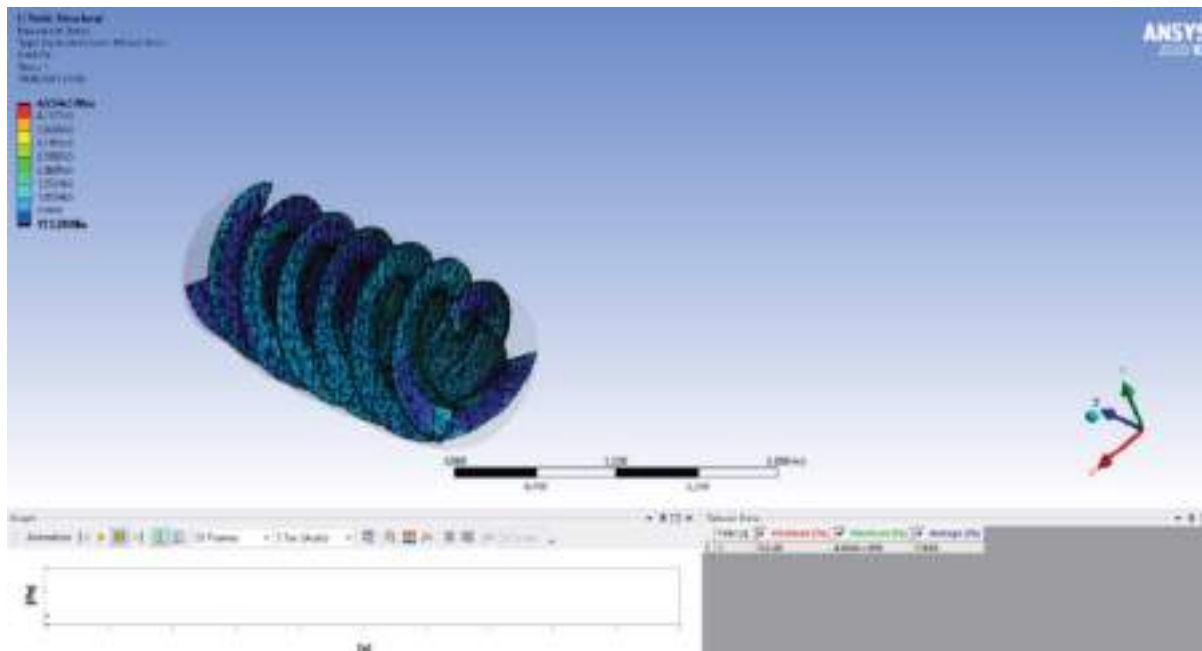


Figura B.38: Tensión elástica equivalente resina polyester

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

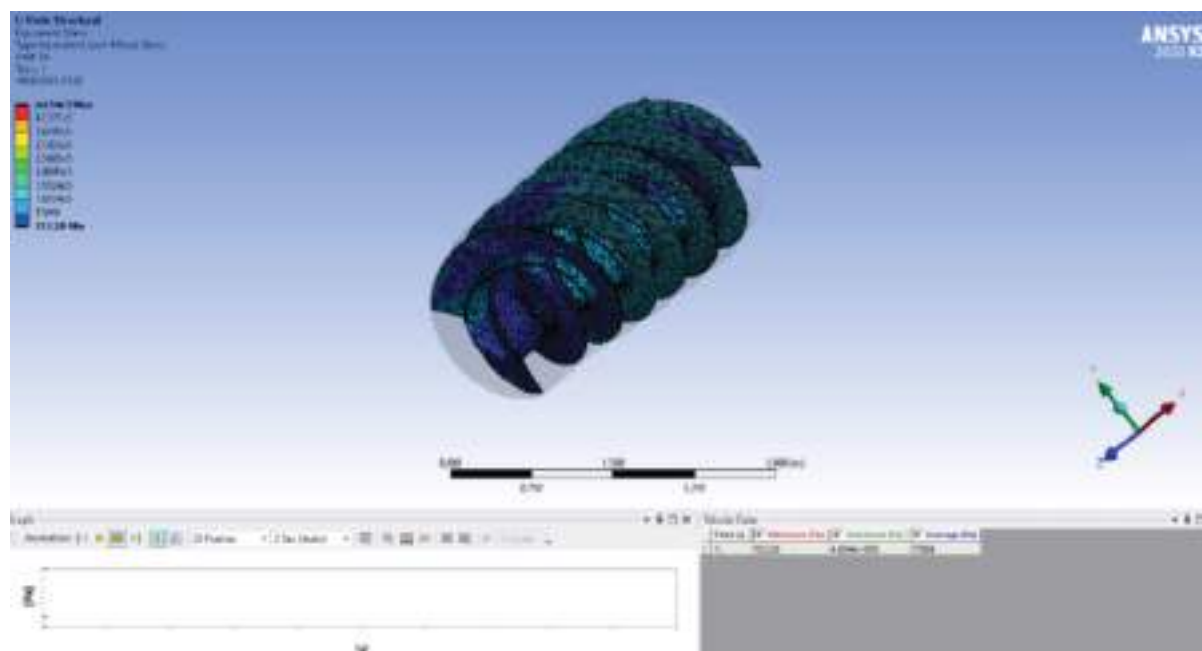
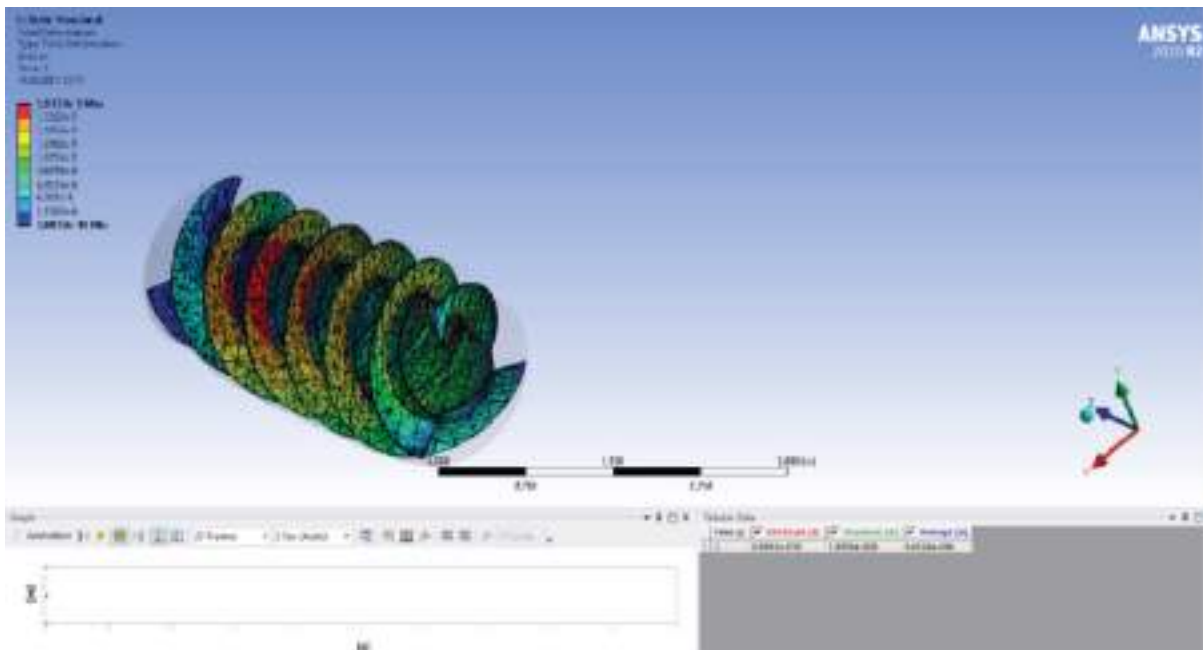


Figura B.39: Tensión equivalente total resina polyester

## Tensión elástica equivalente - lado entrada



## Tensión elástica equivalente - lado salida

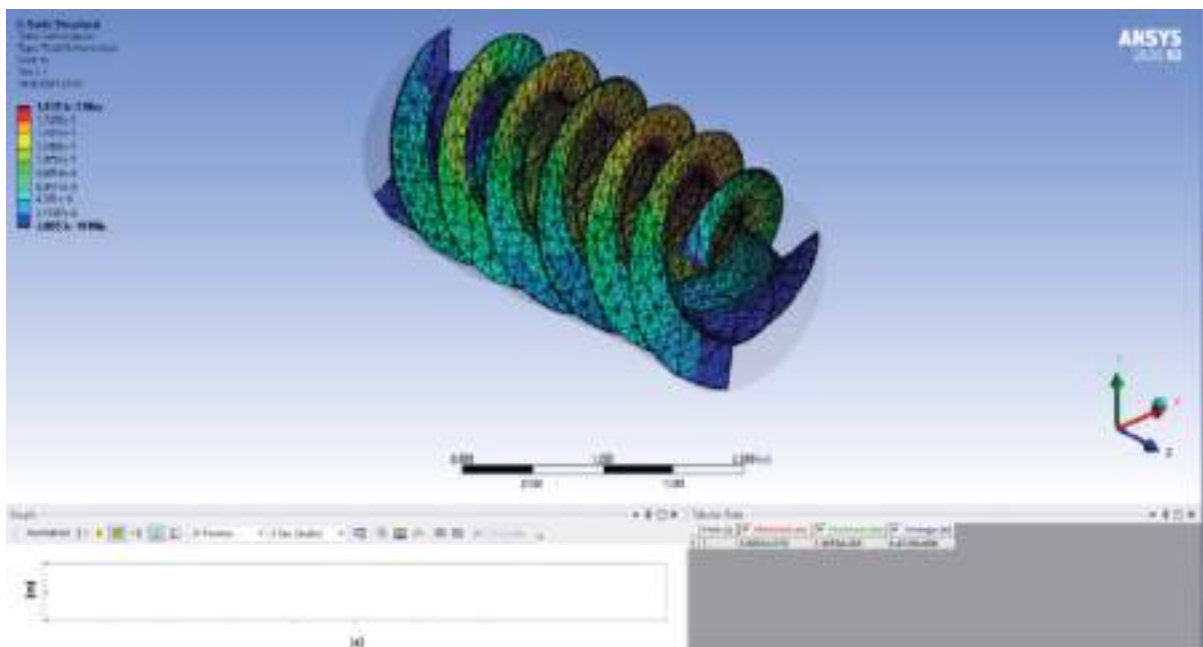
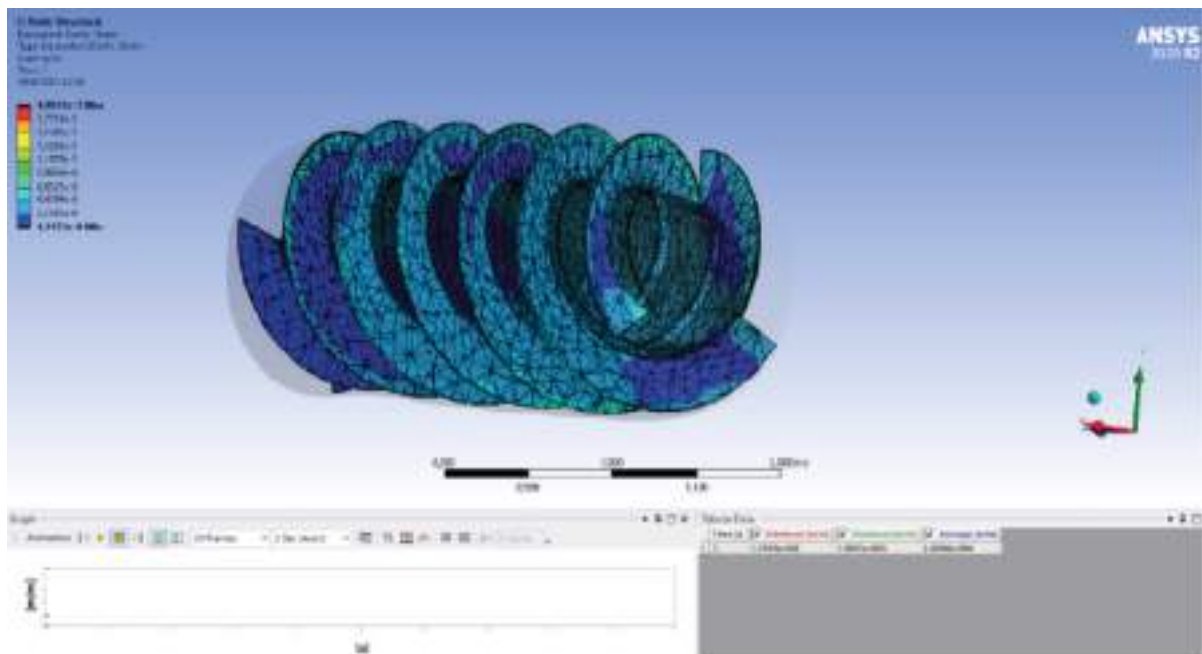


Figura B.40: Deformación total resina polyester

**Compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven**

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

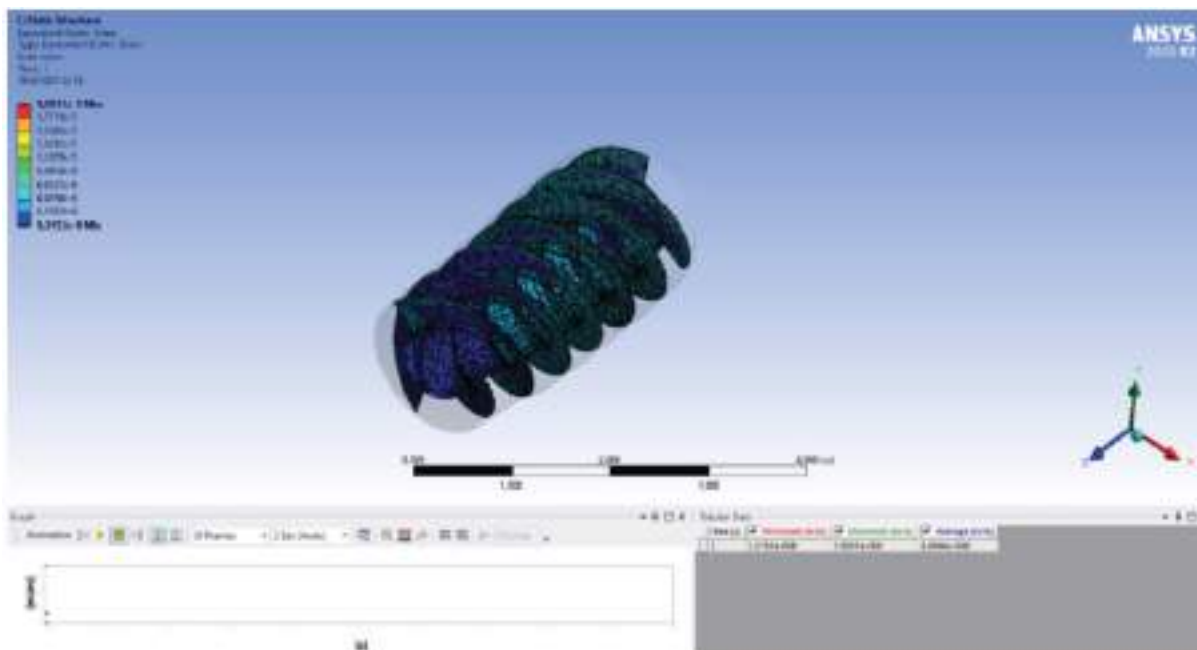
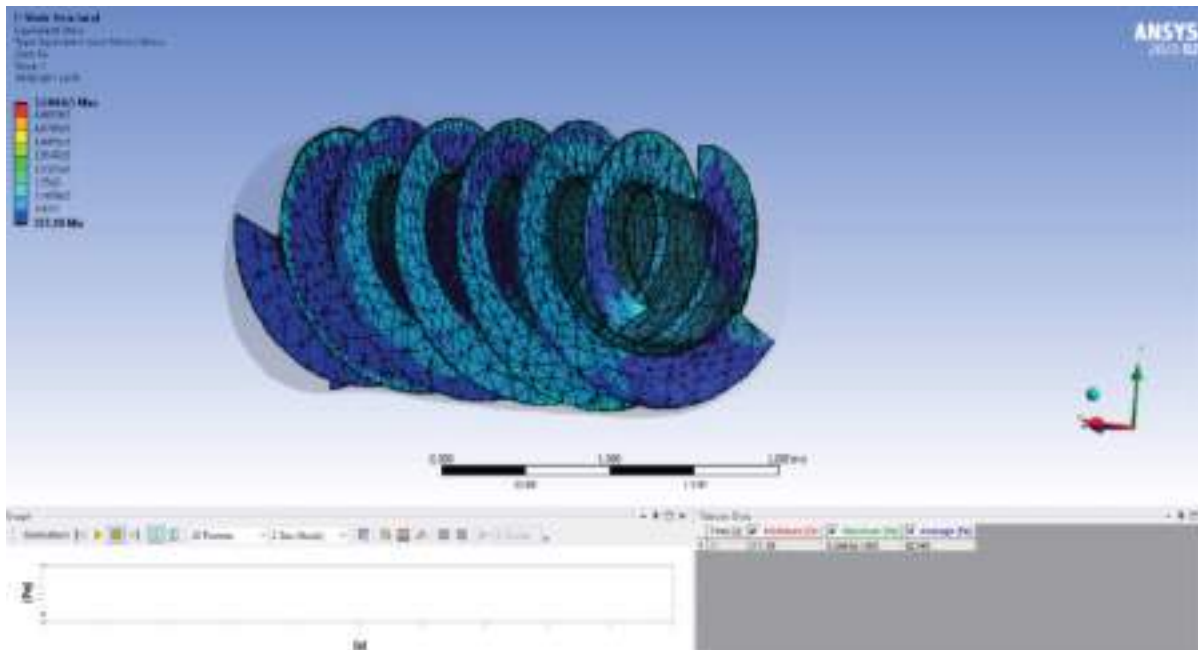


Figura B.41: Tensión elástica equivalente compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven

## Tensión equivalente - lado entrada



## Tensión equivalente - lado salida

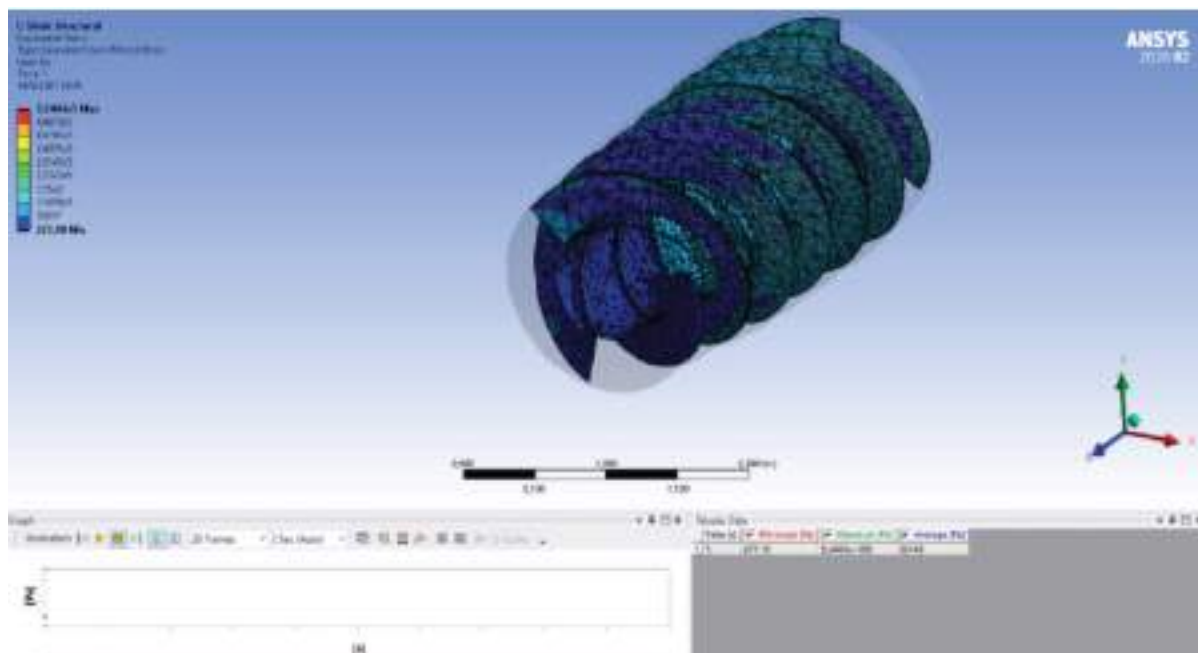
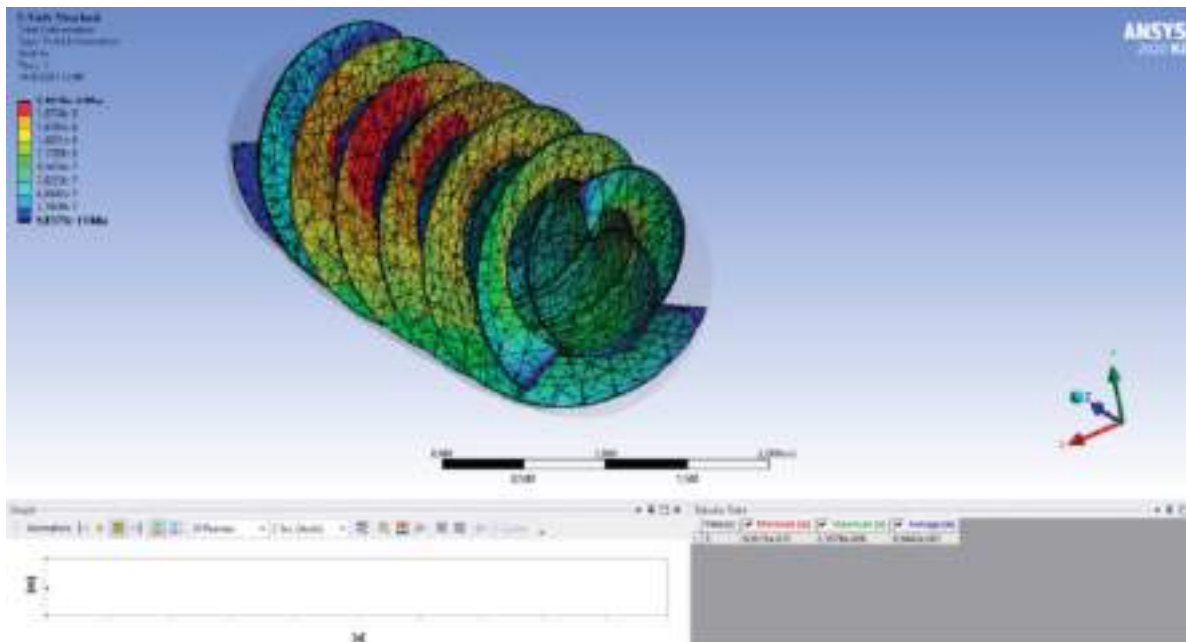


Figura B.42: Tensión equivalente total compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

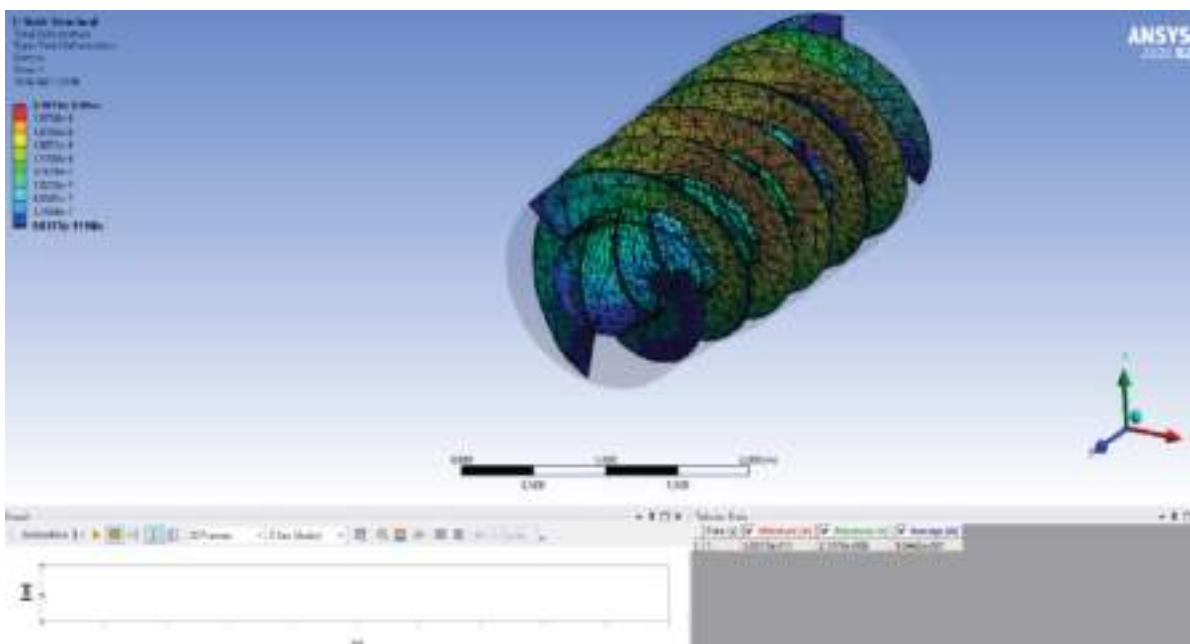
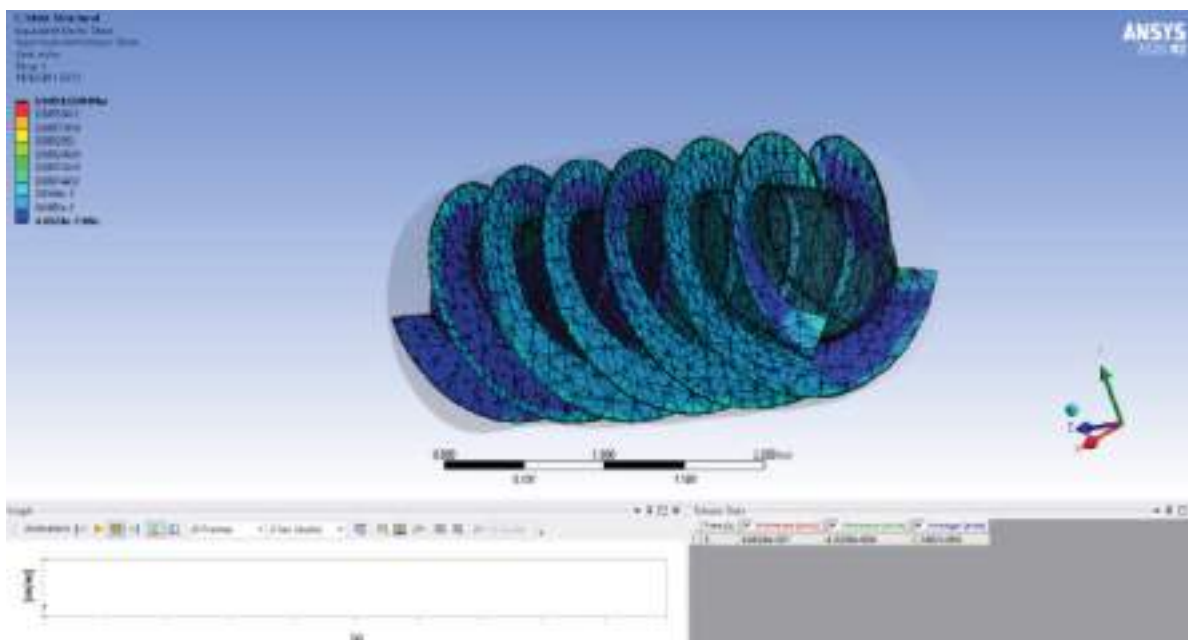


Figura B.43: Deformación total compuesto epoxy/fibra de vidrio Woven

## Poliamida Nylon 6

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

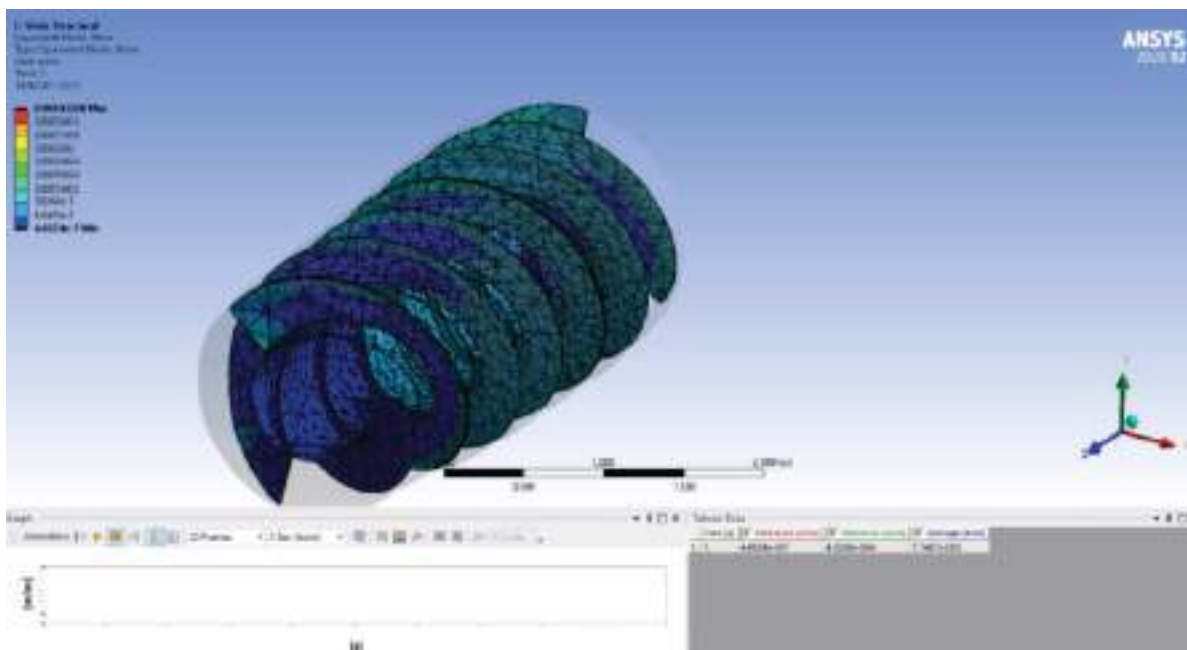
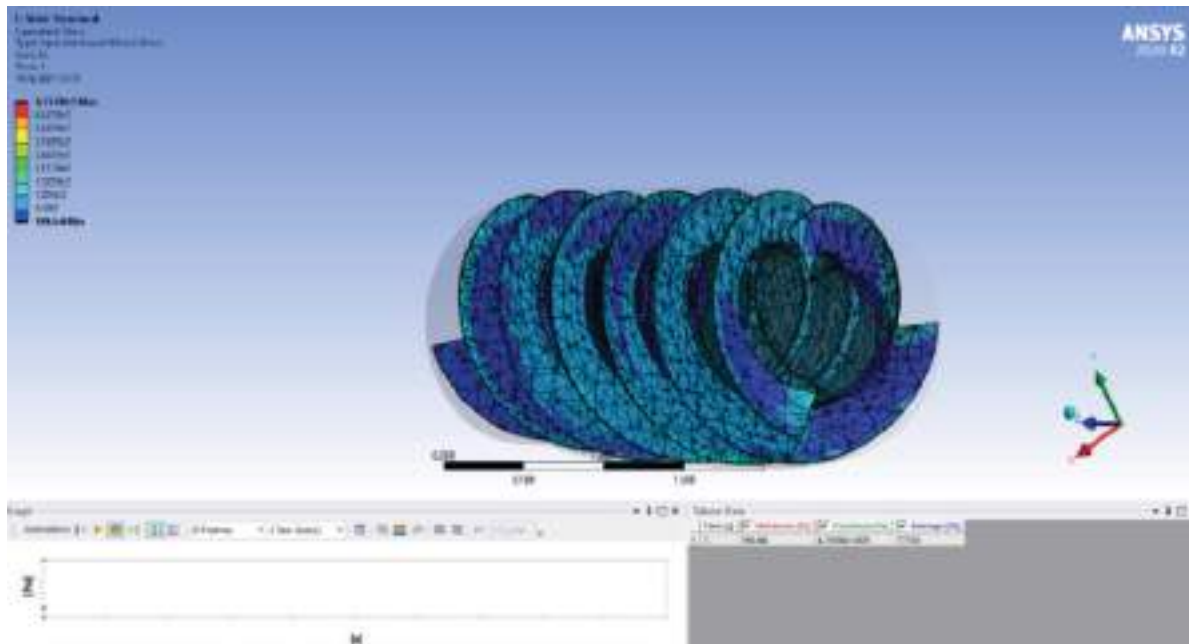


Figura B.44: Tensión elástica equivalente poliamida Nylon 6



Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

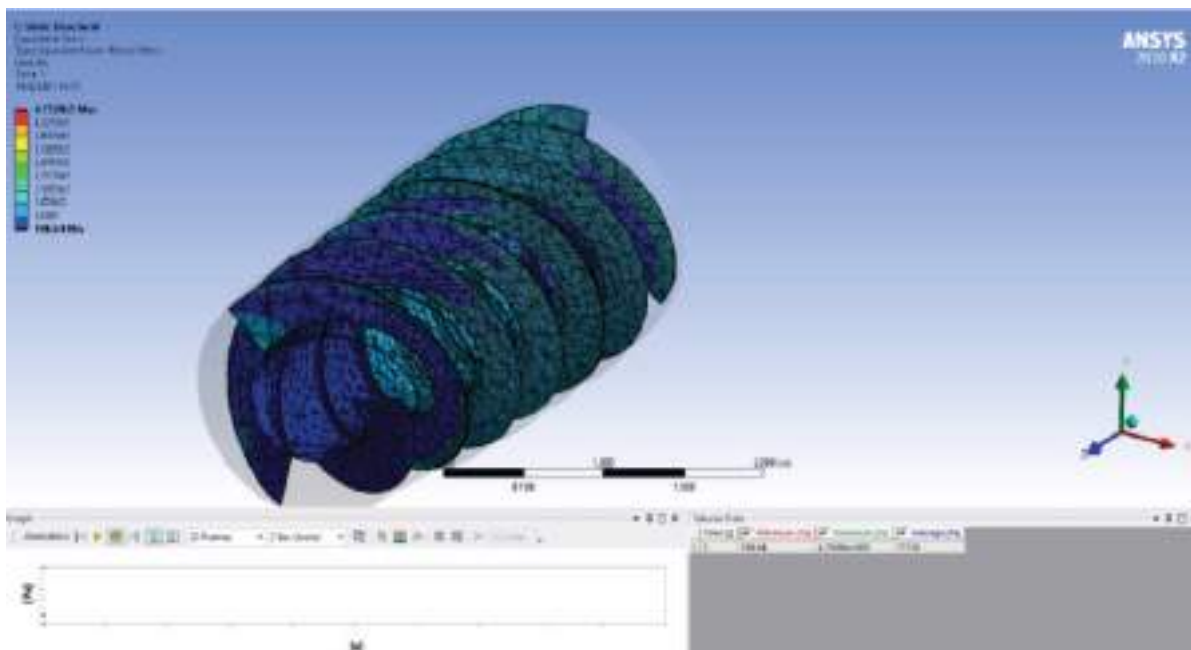
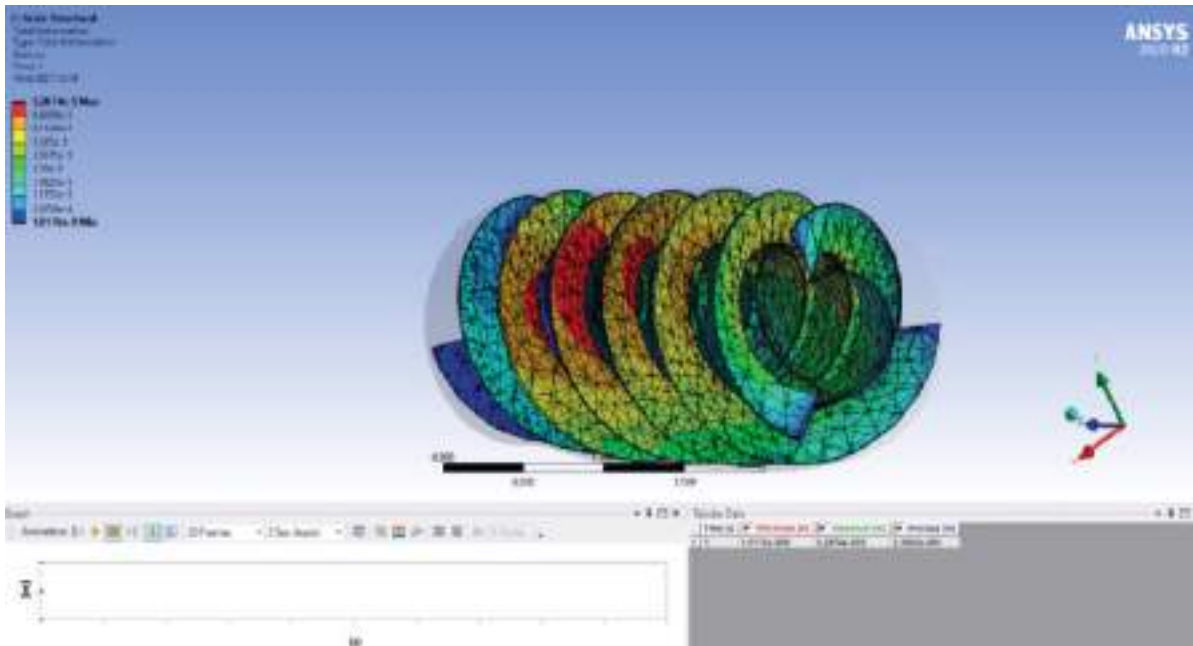


Figura B.45: Tensión equivalente total poliamida Nylon 6

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

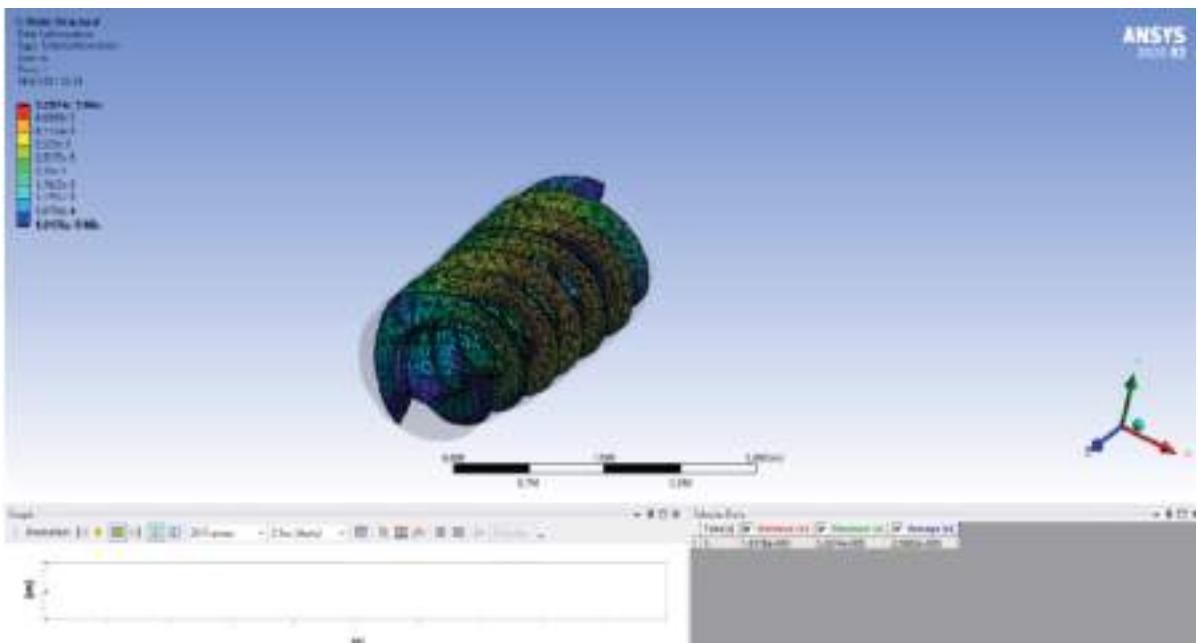
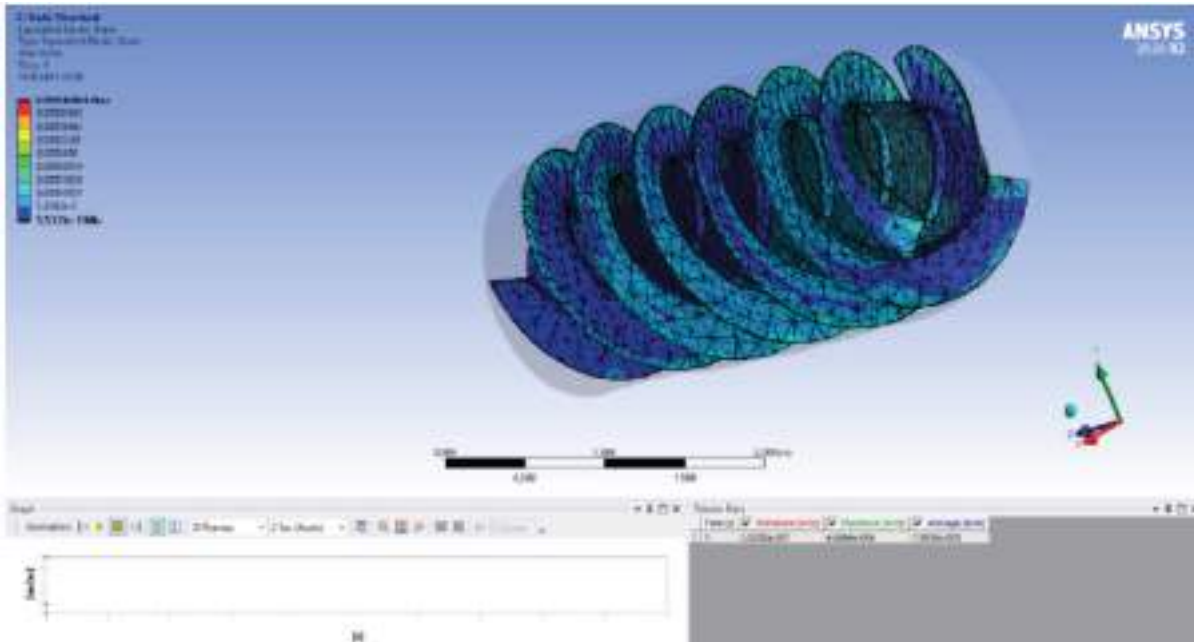


Figura B.46: Deformación total poliamida Nylon 6

**Polietileno de alta densidad HDPE**

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

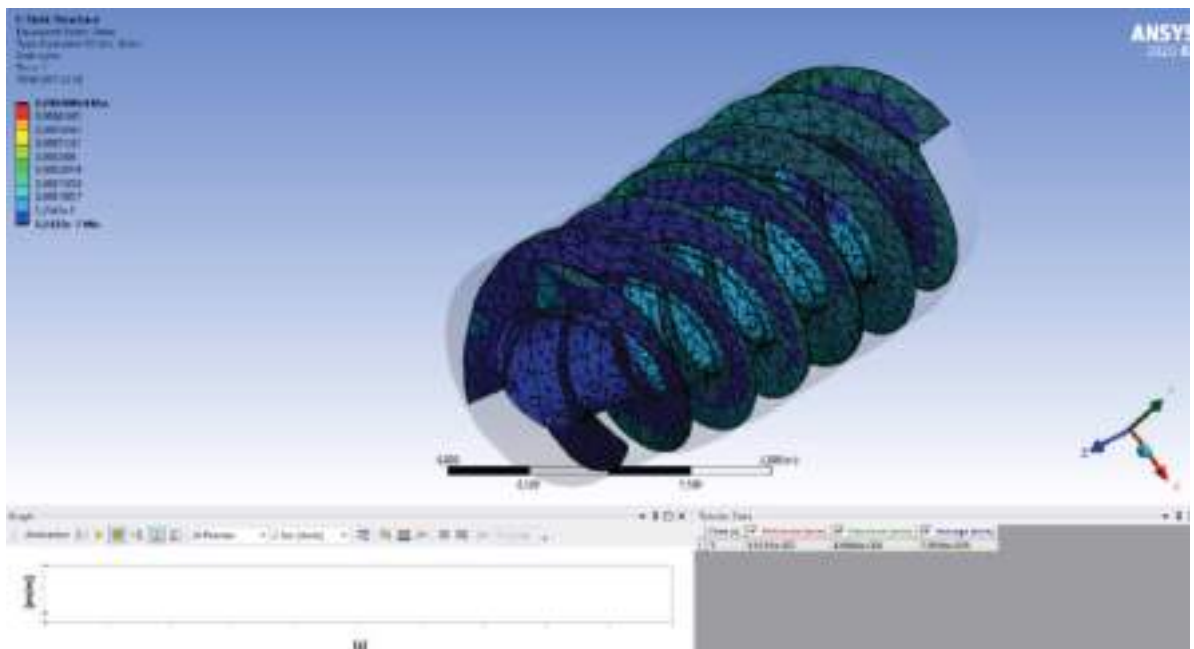
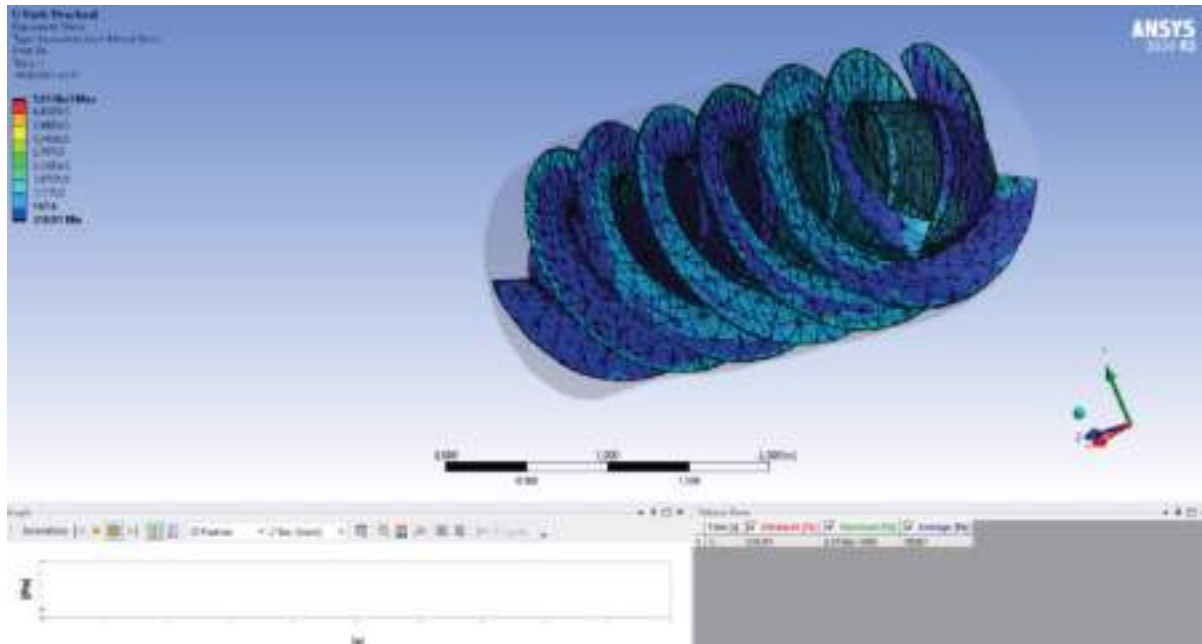


Figura B.47: Tensión elástica equivalente polietileno de alta densidad HDPE

## Tensión equivalente - lado entrada



## Tensión equivalente - lado salida

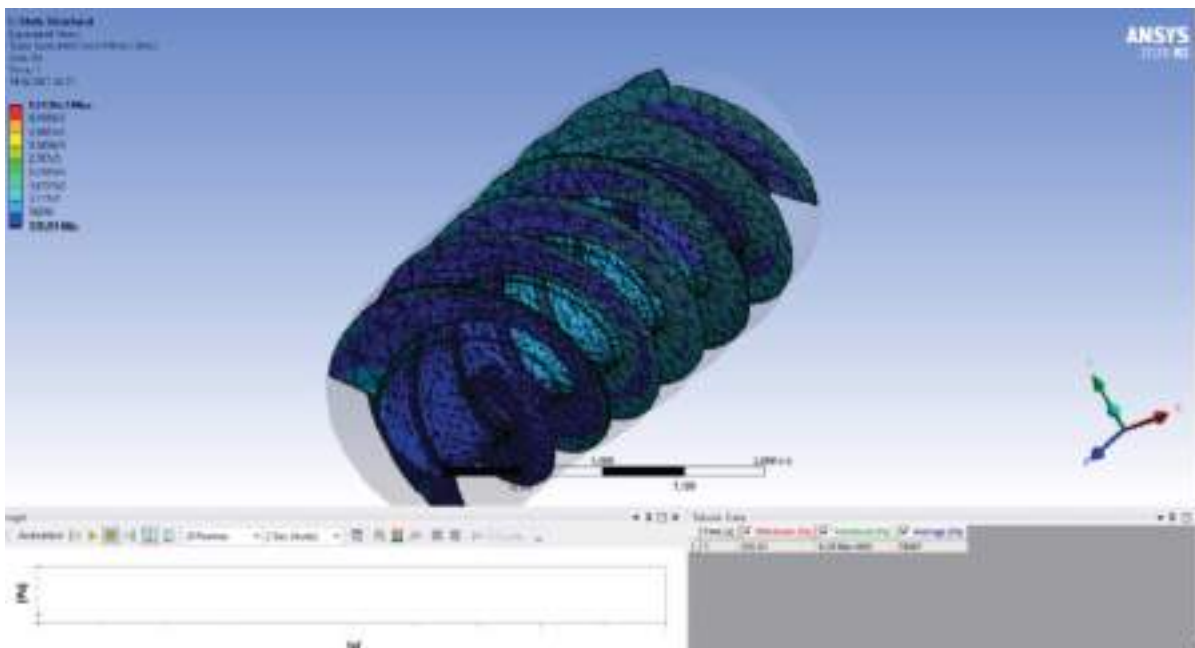
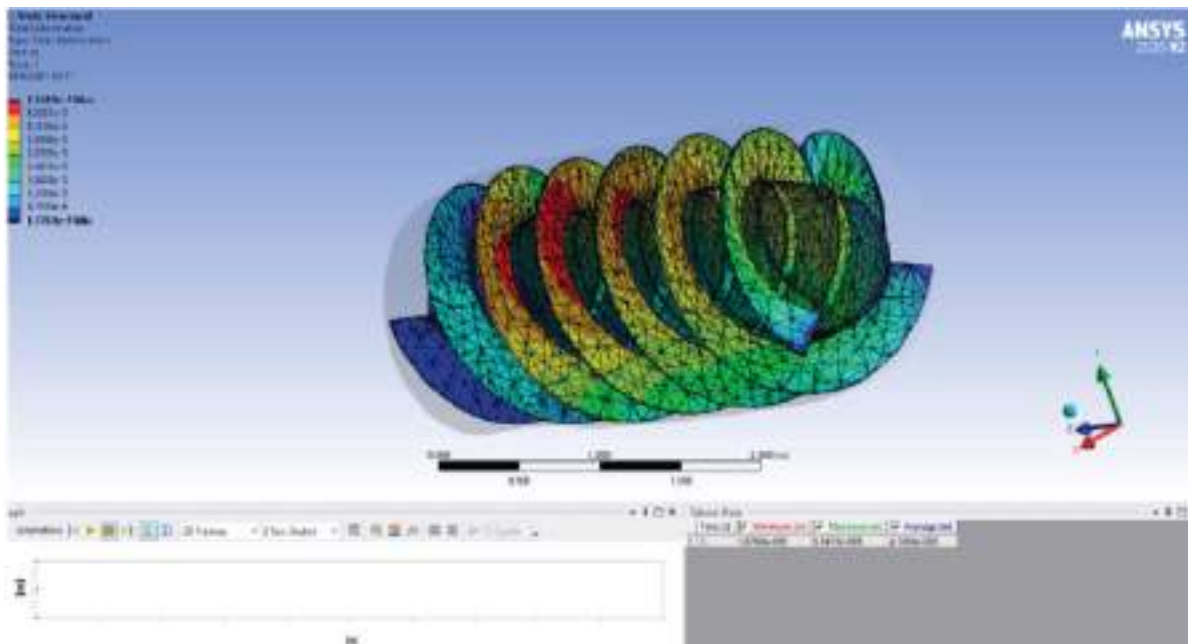


Figura B.48: Tensión equivalente total polietileno de alta densidad HDPE

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

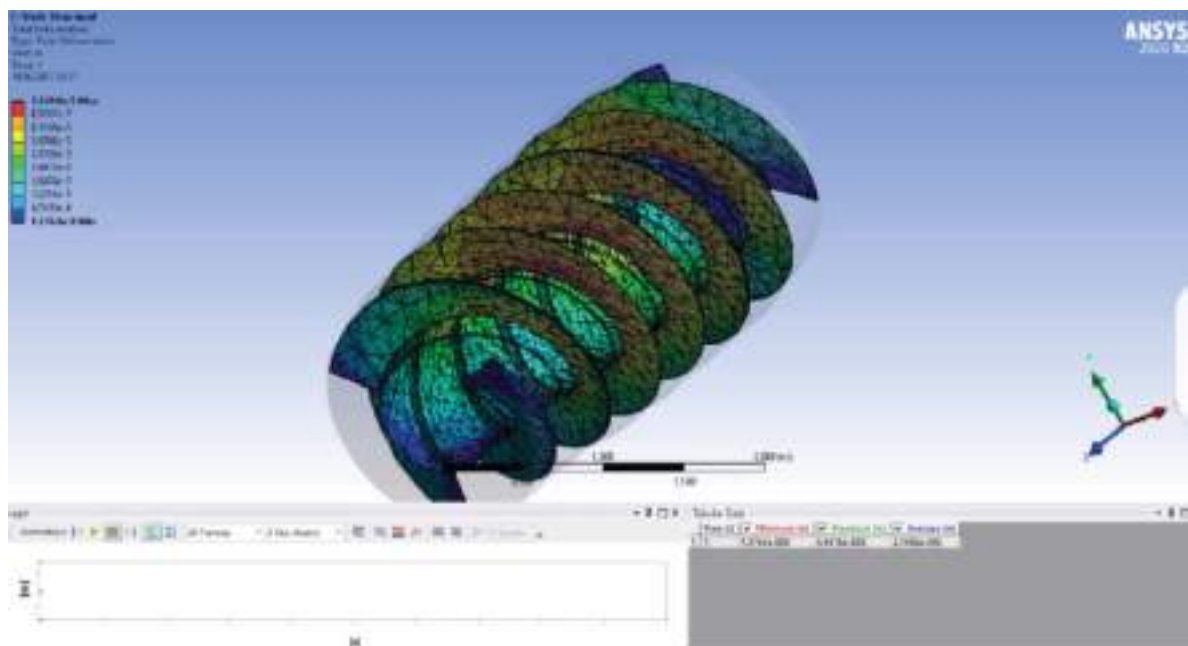
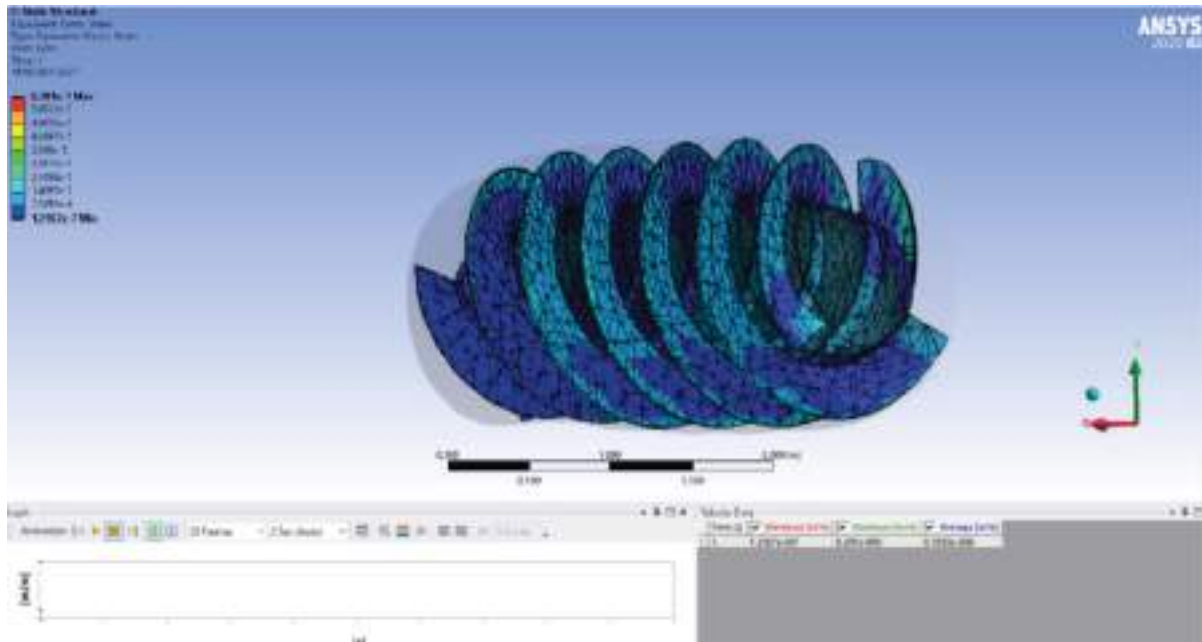


Figura B.49: Deformación total polietileno de alta densidad HDPE

## Epoxy / fibra de carbono woven

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

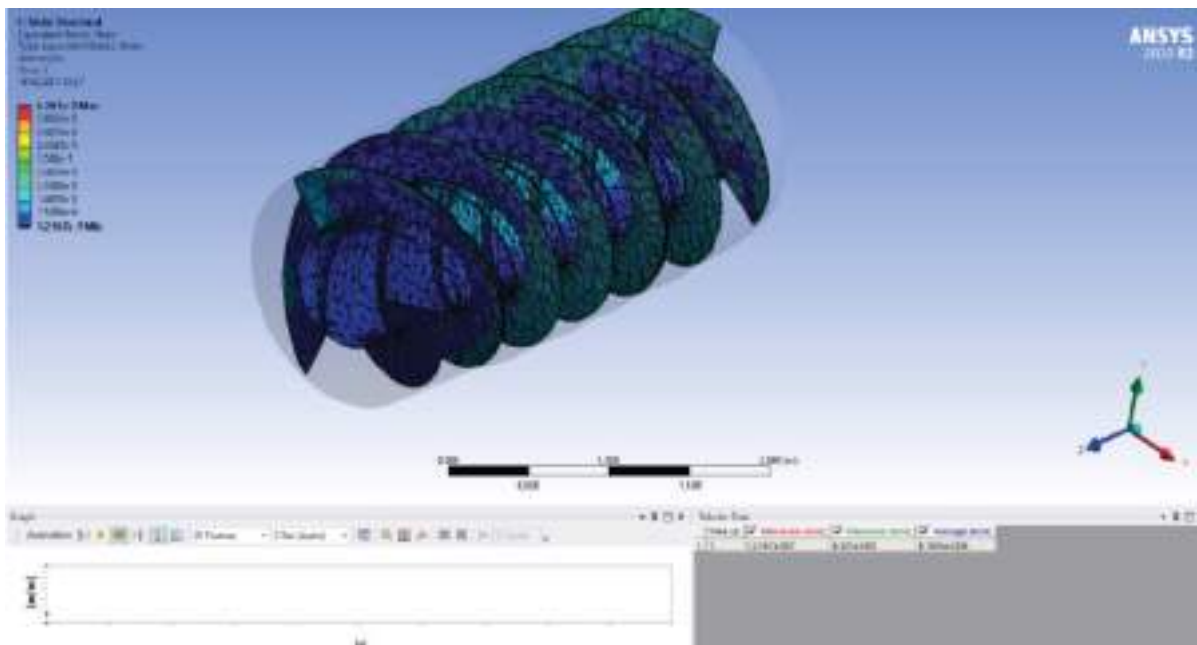
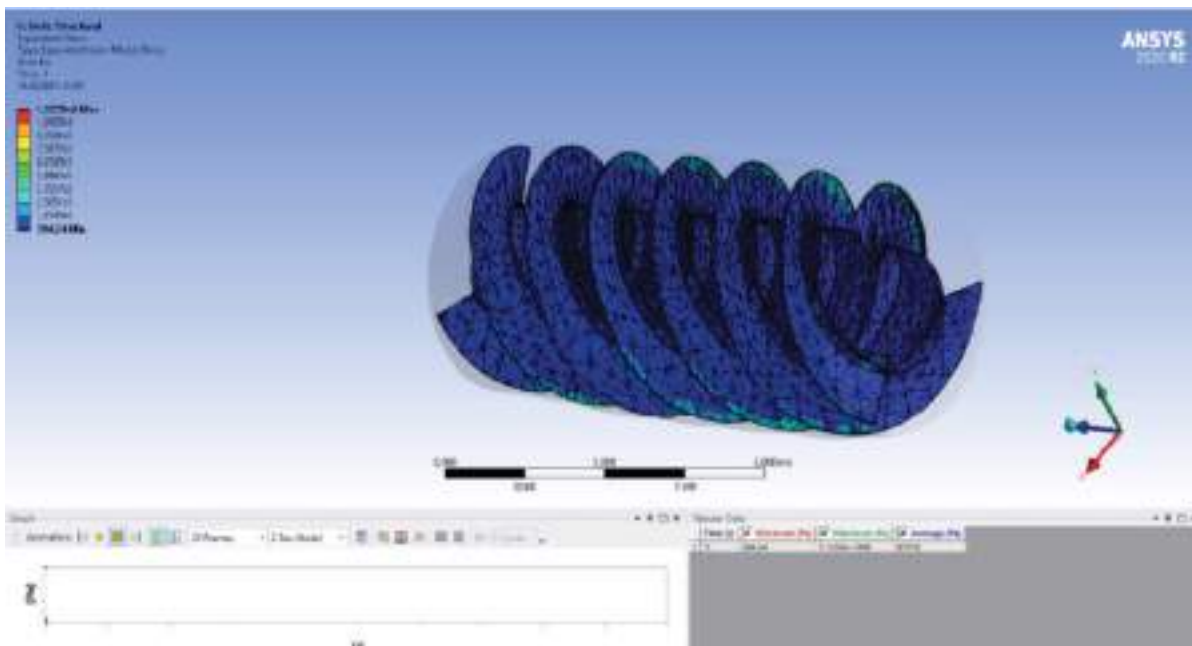


Figura B.50: Tensión elástica equivalente epoxy / fibra de carbono woven

Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

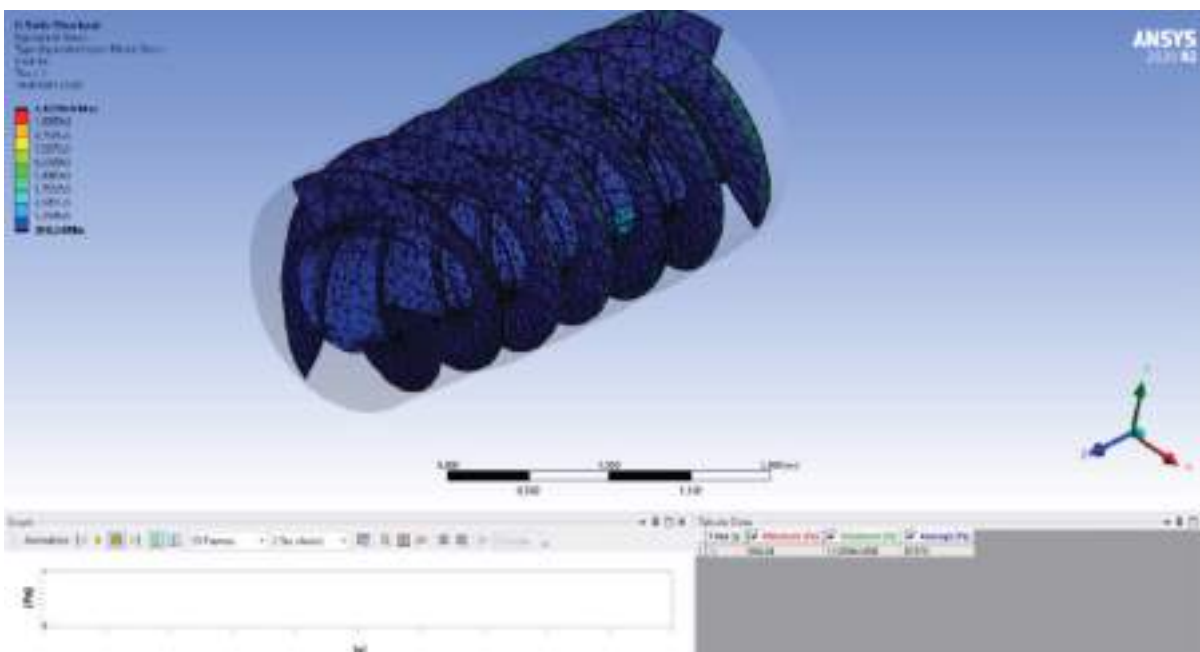
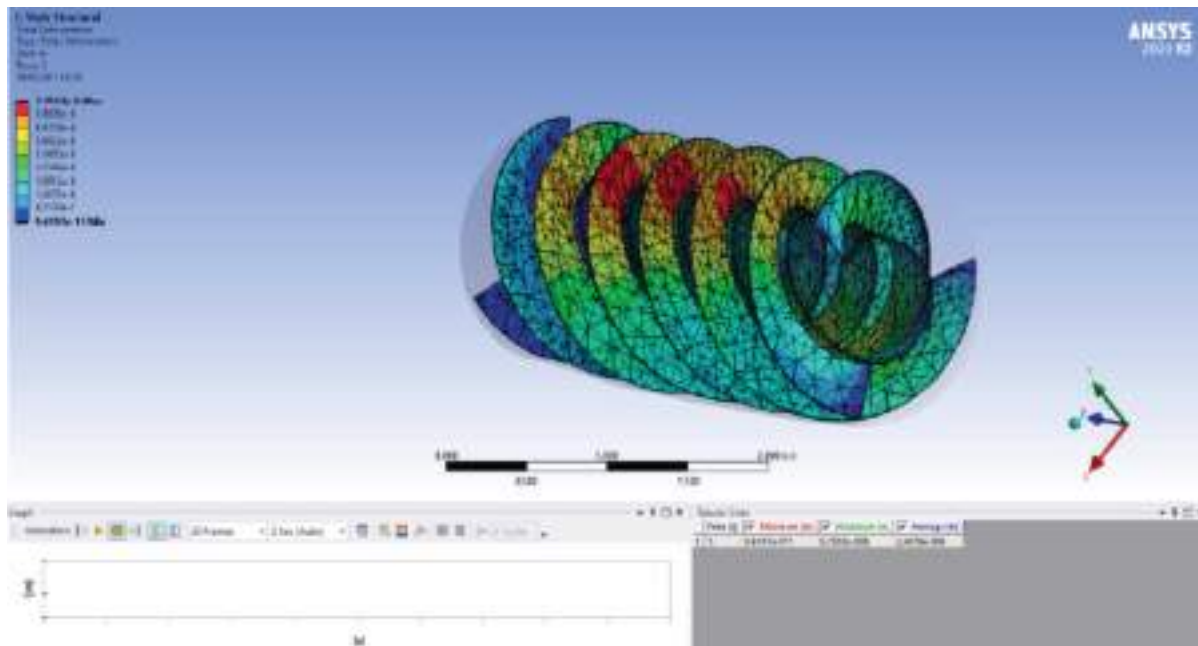


Figura B.51: Tensión equivalente total epoxy / fibra de carbono woven

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

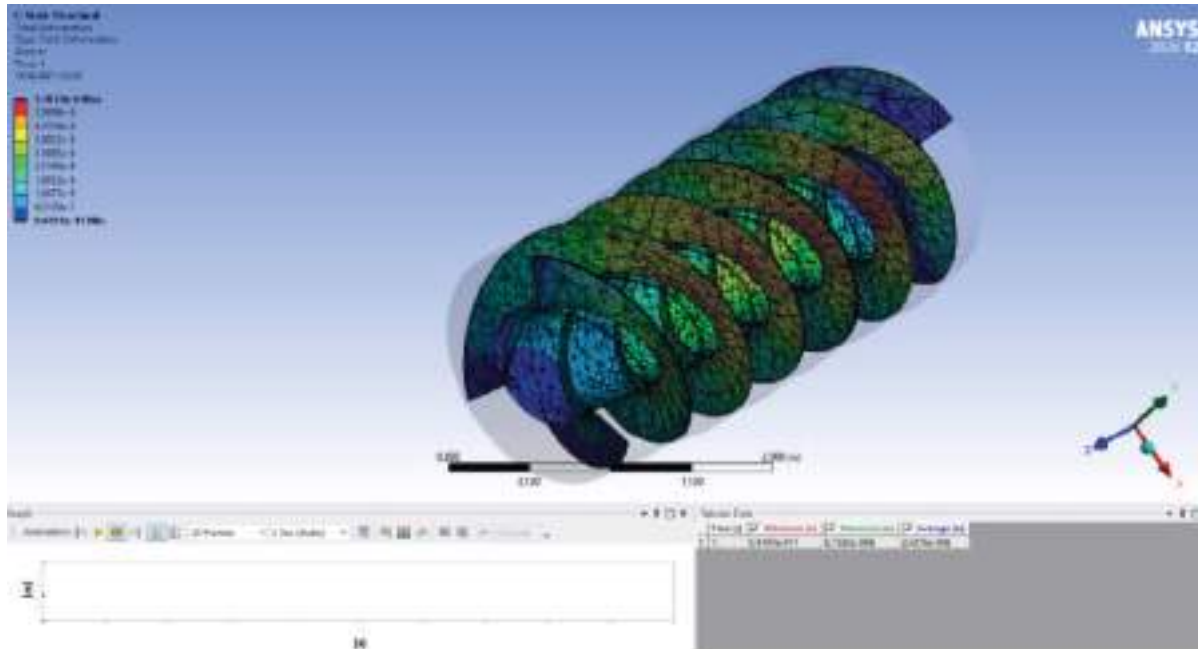
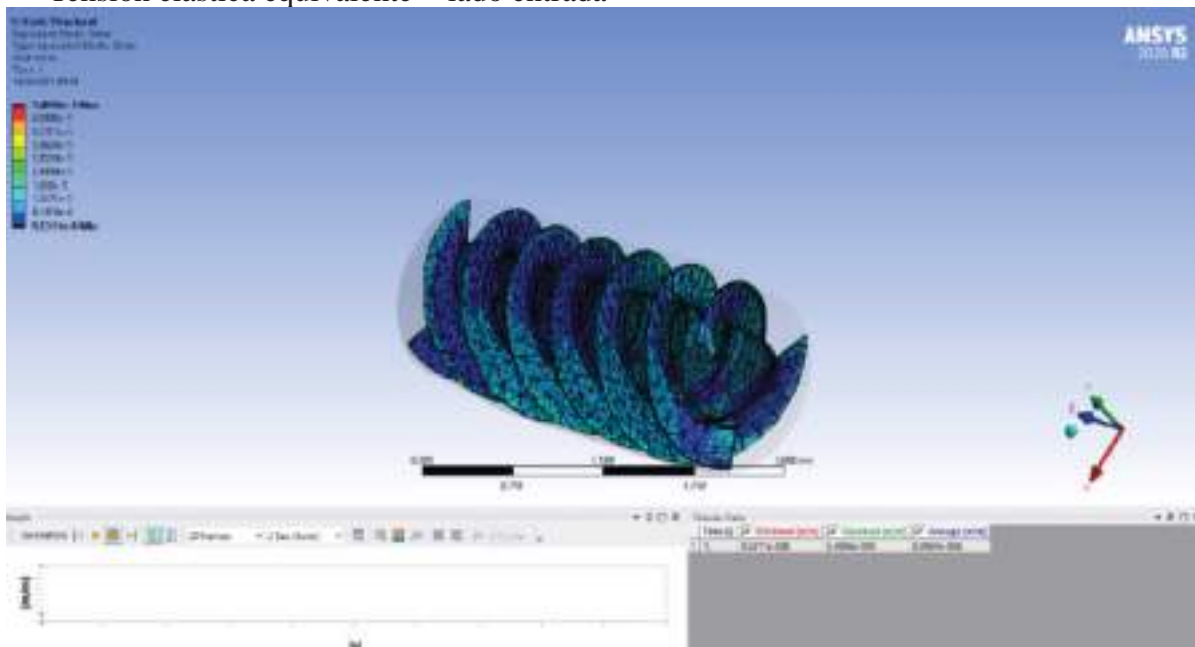


Figura B.52: Deformación total epoxy / fibra de carbono woven



Epoxy E-glass Wet

Tensión elástica equivalente - lado entrada



Tensión elástica equivalente - lado salida

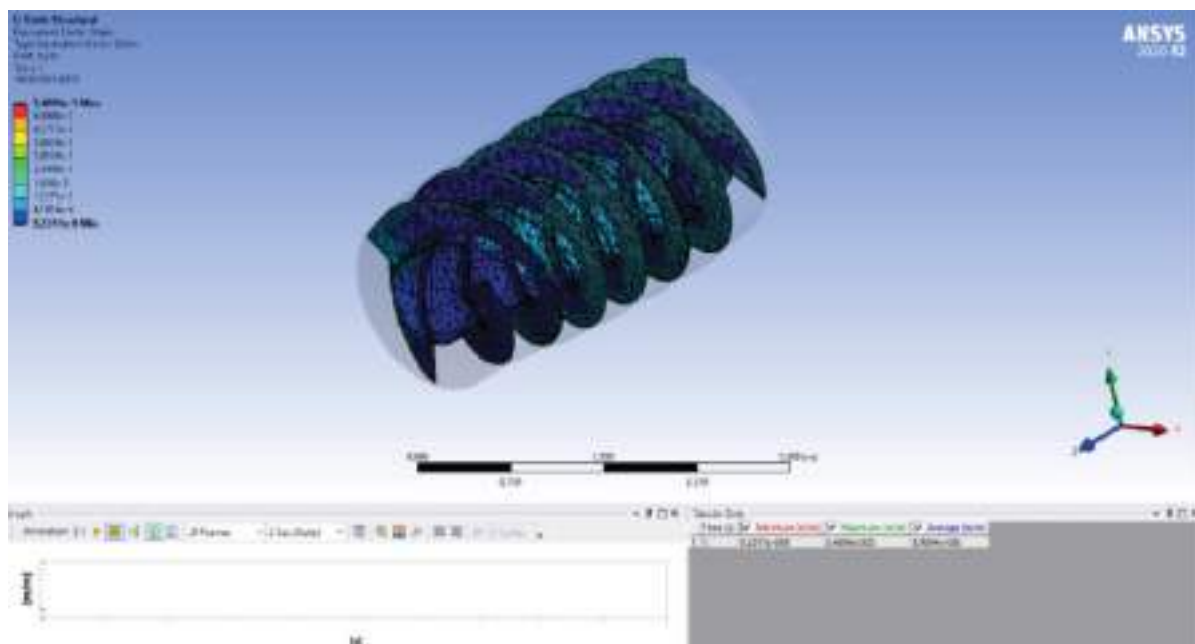
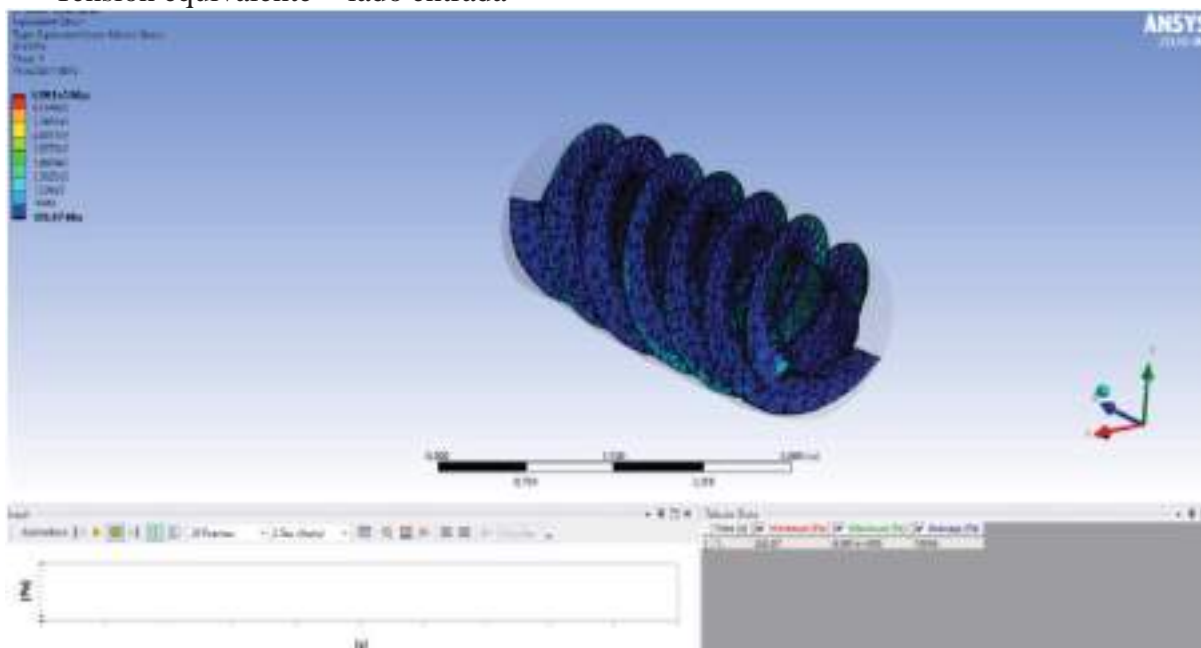


Figura B.53: Tensión elástica equivalente epoxy E-glass Wet

Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

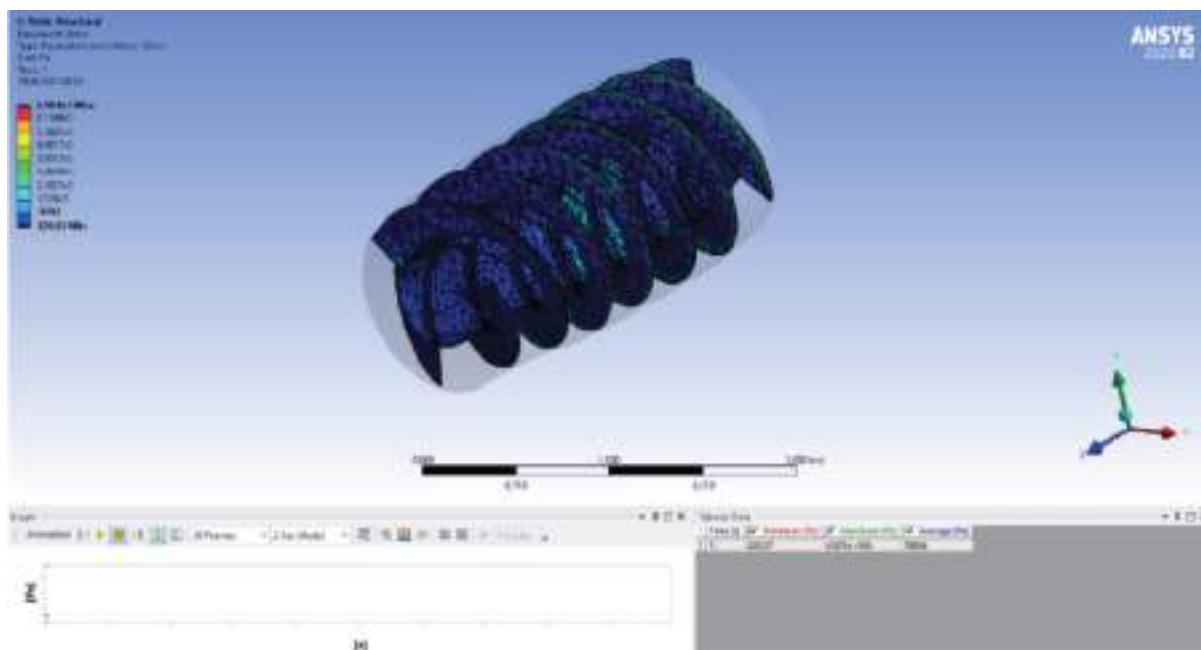
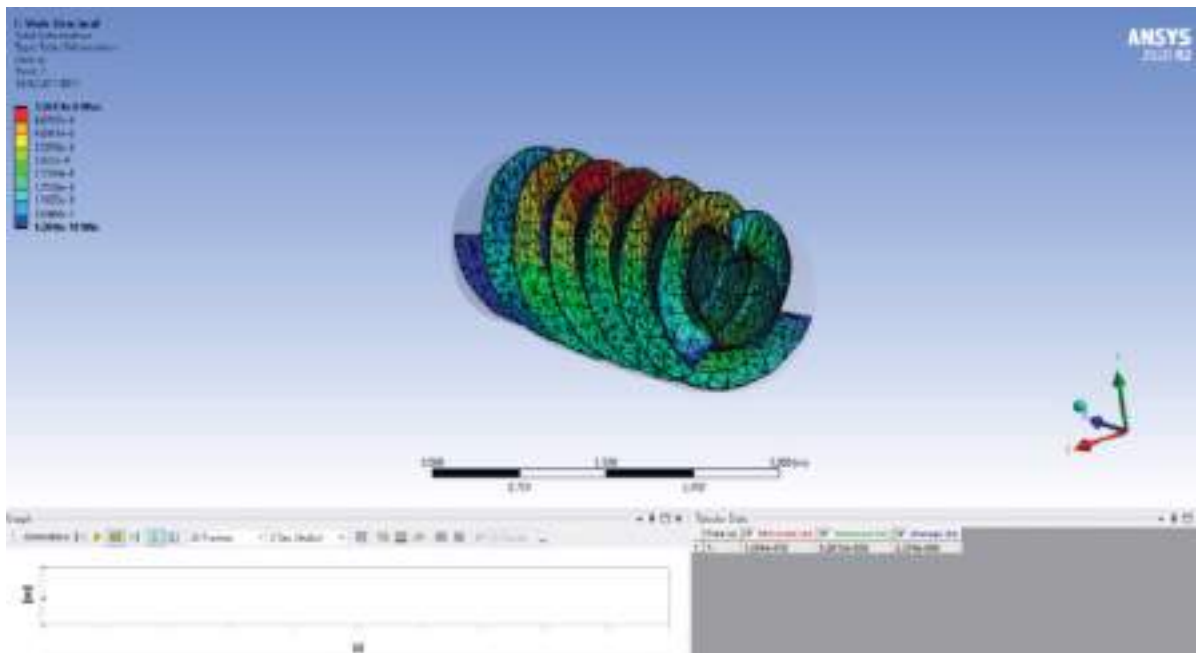


Figura B.54: Tensión equivalente total epoxy E-glass Wet

Deformación total - lado entrada



Deformación total - lado salida

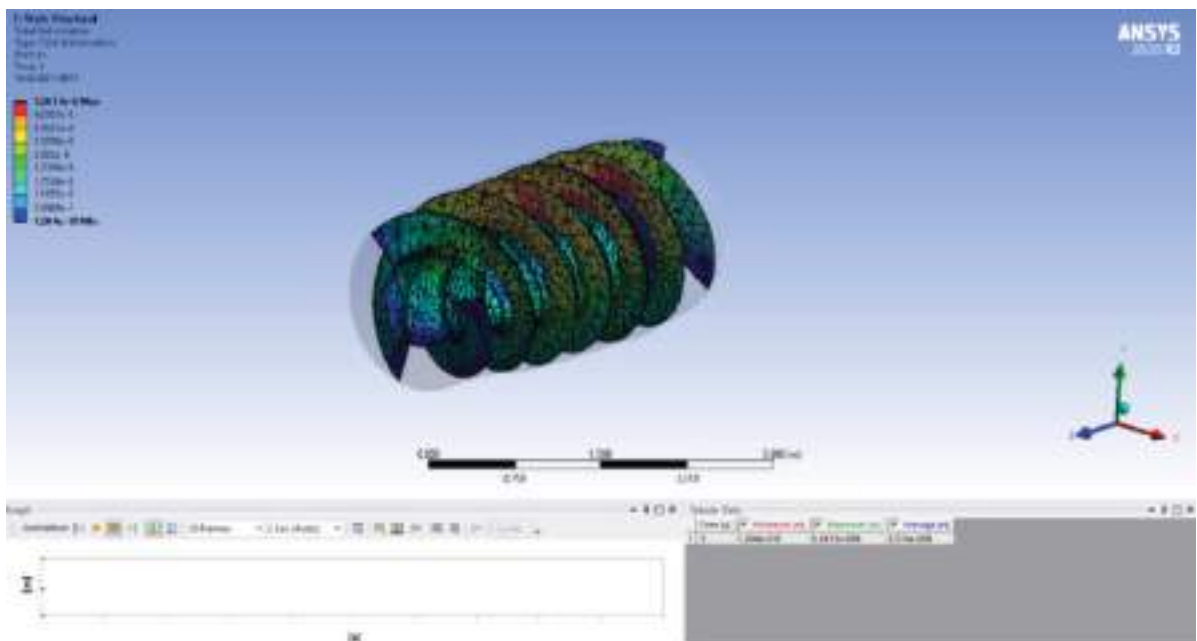
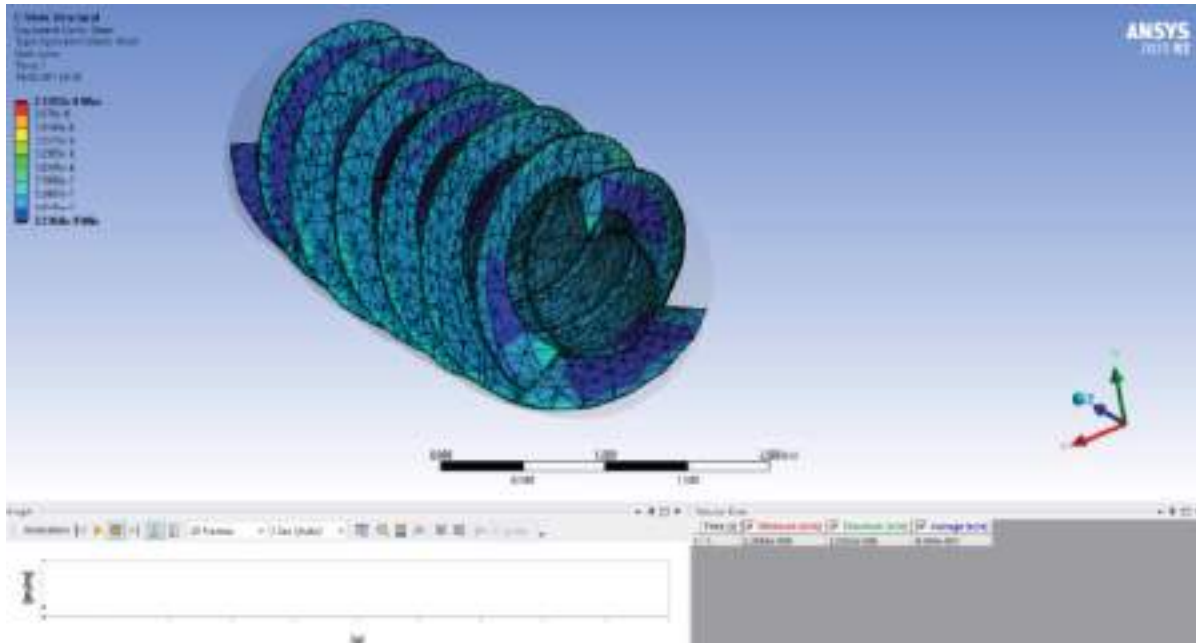


Figura B.55: Deformación total epoxy E-glass Wet

## Acero estructural

### Tensión elástica equivalente - lado entrada



### Tensión elástica equivalente - lado salida

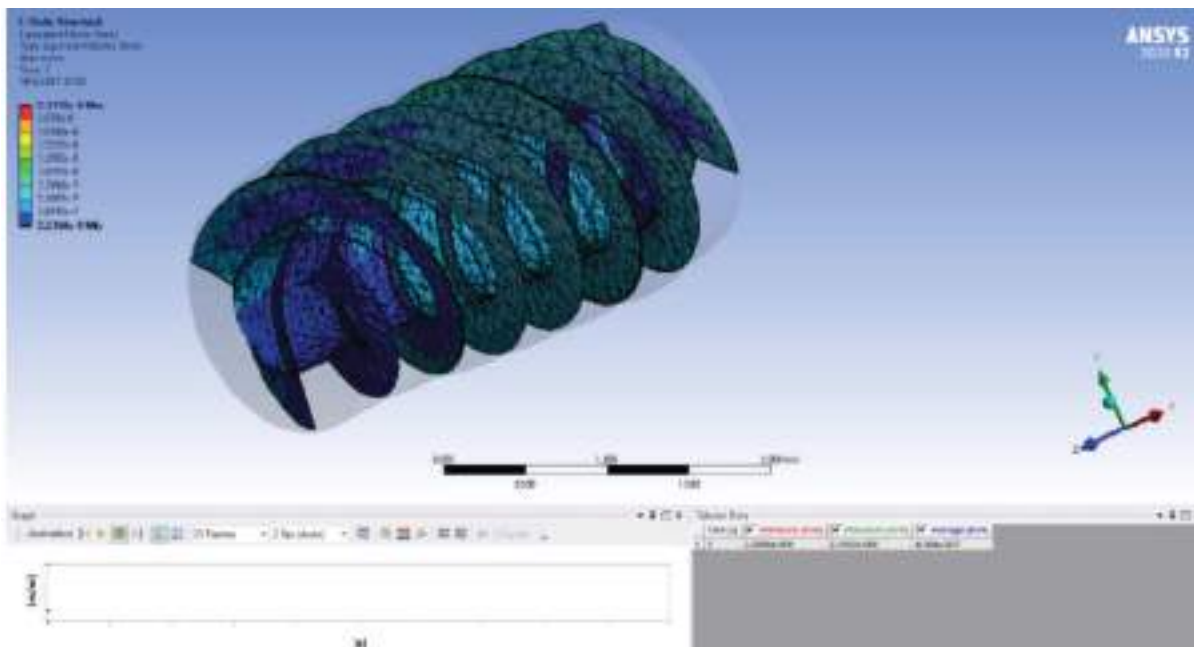
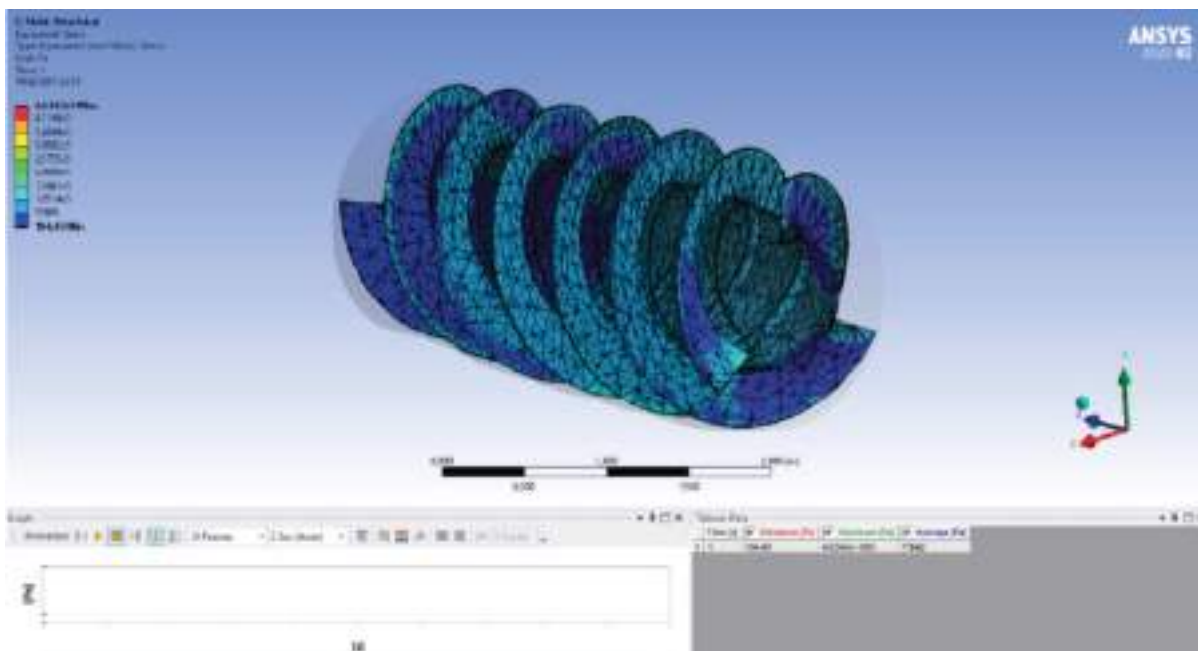


Figura B.56: Tensión elástica equivalente acero estructural

Tensión equivalente - lado entrada



Tensión equivalente - lado salida

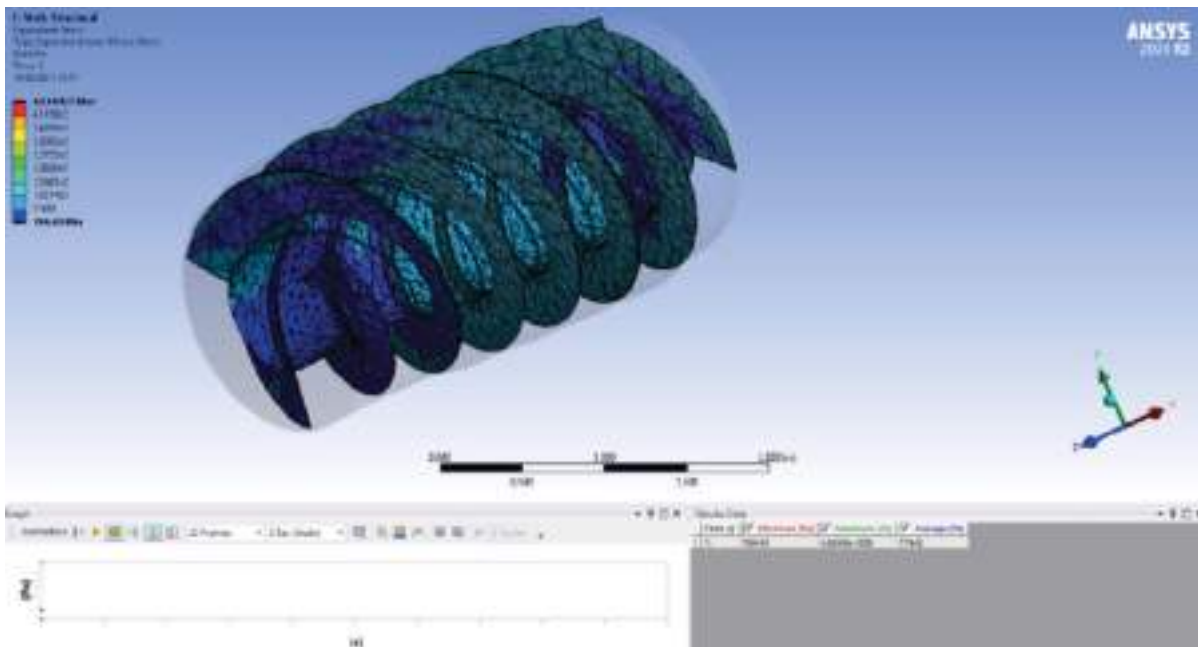
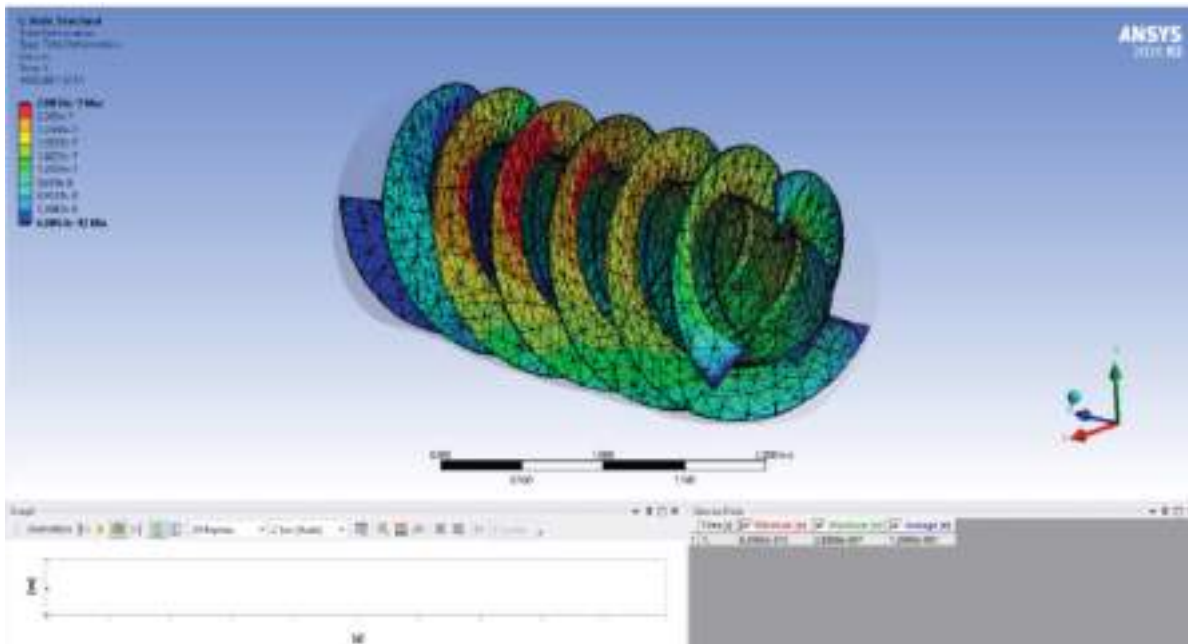


Figura B.57: Tensión equivalente total acero estructural

## Deformación total - lado entrada



## Deformación total - lado salida

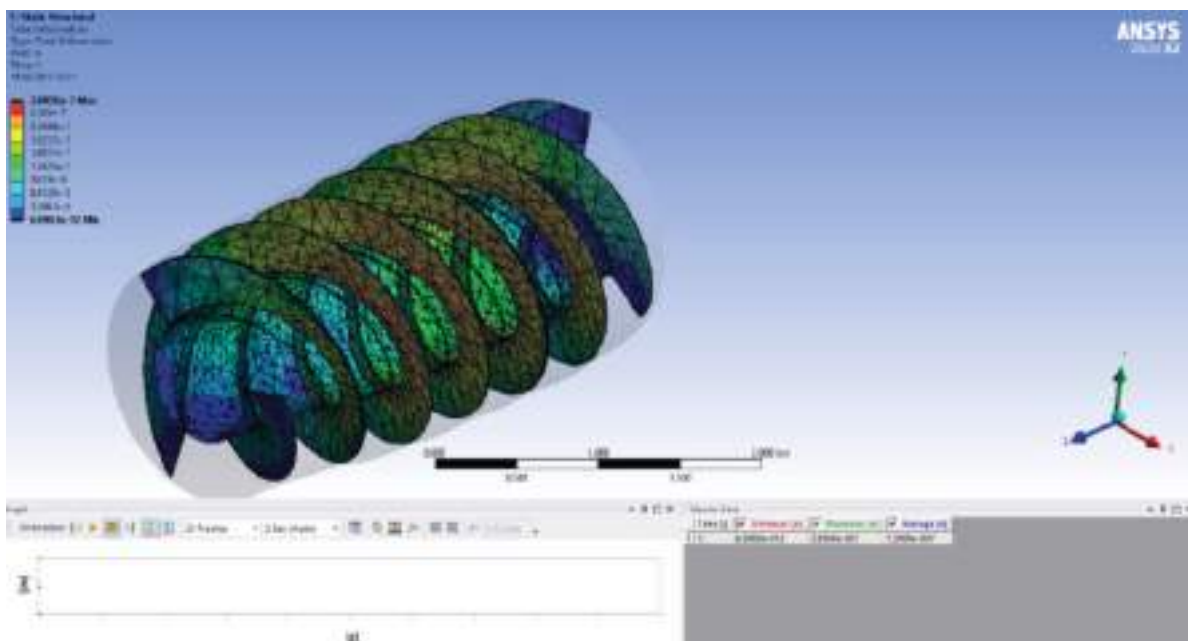


Figura B.58: Deformación total acero estructural

# Apéndice C

## Catálogos

Se presenta a continuación los elementos utilizados para conformar la instalación del conjunto generador. El motor será un motor direct drive, en general se fabrican de acuerdo a las especificaciones y requerimientos del cliente. Sin aumento de pérdidas por componentes adicionales: La conexión directa del motor al eje permite evitar problemas como pérdidas por fricción, holgura de engranajes, movimientos imprecisos o desgaste, posibilitando una mejor eficiencia global. El ahorro de la caja de engranajes y su mantenimiento es fundamental en este caso. En general los distribuidores de estos productos trabajan a escala mundial y brindan asesoramiento para la instalación.

**20kw Low Speed/Rpm Brushless Direct Drive Long Life Time Permanent Magnet Generator**



Min. Order / Reference FOB Price	
1 Set	US \$300-130,000/ Set
Port:	Qingdao, China
Production Capacity:	400 Sets Per Month
Payment Terms:	T/T, Western Union, Paypal, Money Gram
Output Type:	AC Three Phase
Output Power:	50W - 5000kw
Rated Speed:	230rpm - 3000rpm
Optional Voltage:	48/96/120/220/230/240/380/400/596/1140VAC
Application:	Wind Turbine, Hydro Project
Protection Grade:	IP54 or Customized

Figura C.1: Motor-generador seleccionado



Model NO	GDF	Structure	Steel
Magnetic	Neodymium Magnet NdFeB N35ish	Characteristic	Permanent Magnet Synchronous Generator
Shaft Quantity	Single Shaft or Double Shaft	Weight Range	30kg - 1.3 Ton
Trademark	DREEF	Transport Package	Wooden Case
Specification	Depends on the generator size	Origin	China
HS Code	85010100		

Rated power	0.5kW - 5000kW
Rated rotate speed	10rpm - 3000rpm
Rated voltage	24VAC - 1140VAC
Winding Method	F
Generator type	Permanent Magnet AC
Number of phase	Three phase
Classification of degree	IP54
Generator shell material	Steel

**Product Advantages:**

- 1 Rare earth Nd-Fe-B permanent magnets
- 2 Low Speed
- 3 Direct Drive ,no use gear-box
- 4 ball bearing
- 5 Power factor close to 1
- 6 Maintenance free, can be used in all environments
- 7 Long life time >20years, could run at high speed 24 hours 365 days
- 8 Multi poles design improve the frequency and efficiency of rectifiers and inverters
- 9 Customized Voltage, Speed, Power, Efficiency etc.
- 10 H class insulation, vacuum pressure impregnation
- 11 Excellent heat dissipation, also can add fan cooling

Figura C.2: Motor-generador seleccionado

El encoder o sensor de velocidad apropiado para este generador teniendo un eje de aproximadamente 32mm será:



Figura C.3: Encoder seleccionado

El convertidor como se desarrolló anteriormente usa modulación PWM para reducir significativamente picos distintivos de corriente y formar una corriente de onda sinusoidal perfecta. Tiene una gran cantidad de aplicaciones en la cual se destaca la generación aislada ya que permite inyectar energía con la calidad y prestaciones que se exige.



460V	Model AFE	A42A	015	158	218	370	456	750
	Applicable power (kW)		7.5	15	32	37	45	75
	Rated input voltage (V)		320-480Vc					
	Rated input current (A)		20	35	90	75	95	160
	Voltage control		0/6-140Vc					
	Overheat capacity		150% 885cc					
	Frequency tolerance		±5%					
	Power factor (at load side)		0.85 to above 0.99					
	Harmonics (%)		Less than 5% (at rated current)					
	Enclosure type		IP20/NEMA1					
	Cooling method		Fan cooling					
	Installation environment		For indoors and altitudes of 0-1900m (3280 feet), keep away from direct sunlight, corrosive gases, liquids and dust. For altitudes above 1900m (3280 feet), please decrease 2% of rated current for every 500m (1640 feet) increase. The maximum altitude is 2500m (8202 feet).					
	Applied temperature		-10°C~+60°C					
	Storage/transportation temperature		-25~+65°C					
	Applied humidity		Lower than 88%RH (non-condensing)					
	Vibration		1.8m/s²(0.03) less than 10-55Hz (JIS C8040)					

Figura C.4: Convertidor seleccionado

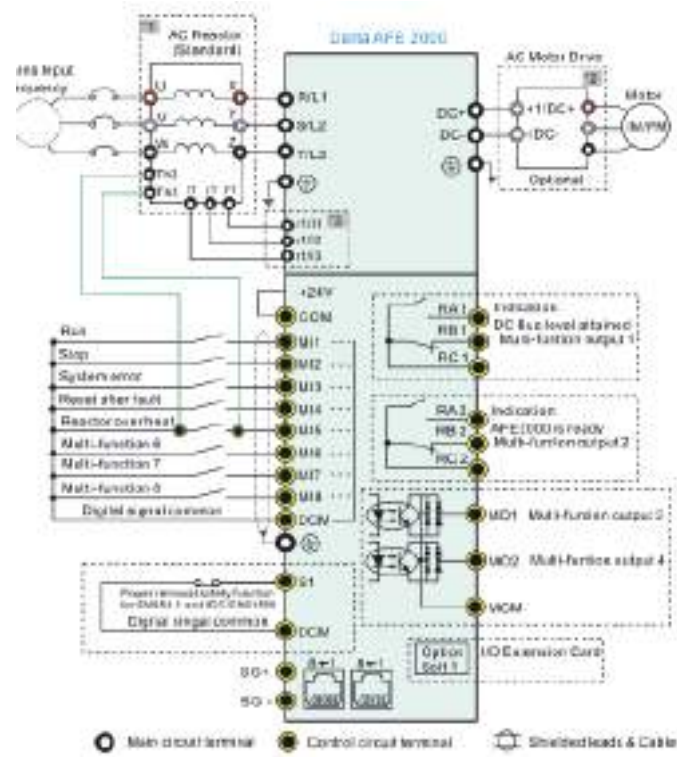


Figura C.5: Esquema detallado de convertidor PWM

■ Frame B

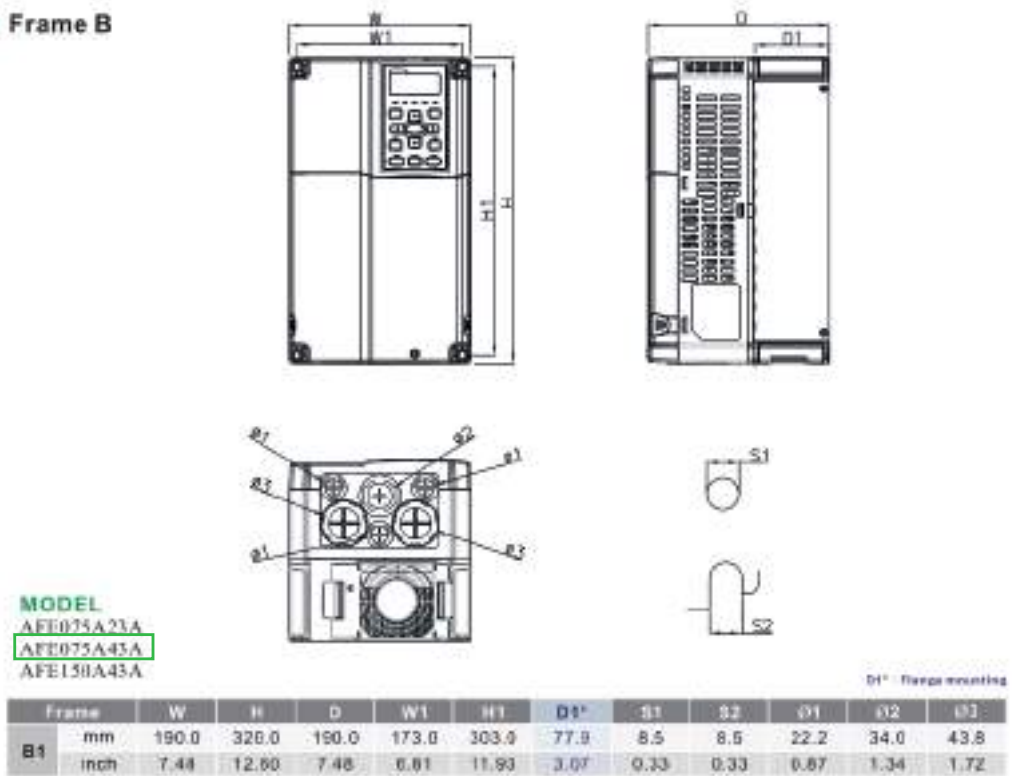


Figura C.6: Dimensiones de convertidor

El variador de frecuencia utilizado es el C2000 como se nombró anteriormente:

**Power range : 460V 0.75 ~ 450kW**

460V (kW)	0.75	1.5	2.2	3.7	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37	45	55	75
460V (HP)	1	2	3	5	5	7.5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	100
Frame Size	A						B			C		D		D		

		460V														
Frame Size		A					B					C				
Output Rating *	Model VFD	007	015	022	037	040	055	075	110	150	185	220	260			
	Rated Output Capacity (kVA)	2.4	3.2	4.8	7.2	8.4	10	14	19	25	30	36	45			
	Rated Output Current (A)	3.0	4.0	6.0	9.0	10.5	12	18	24	30	36	45	60			
	Applicable Motor Output (kW)	0.75	1.5	2.2	3.7	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30			
	Applicable Motor Output (HP)	1	2	3	5	5	7.5	10	15	20	25	30	40			
	Overload Capacity	120% of rated current: 1 minute for every 5 minutes; 100% of rated current: 3 seconds for every 30 seconds														
	Max. Output Frequency (Hz)	0.00 ~ 599.00														
	Carrier Frequency (kHz)	2 ~ 15 (default setting 8)														
	Rated Output Capacity (kVA)	2 ~ 10 (default setting 6)														
	Rated Output Current (A)	2.3	3.0	4.5	6.5	7.8	9.0	14	19	24	29	34	40			
Applicable Motor Output (kW)	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22				
Applicable Motor Output (HP)	0.5	1	2	3	5	5	7.5	10	15	20	25	30				
Overload Capacity	100% of rated current: 1 minute for every 5 minutes; 100% of rated current: 3 seconds for every 30 seconds															
Max. Output Frequency (Hz)	0.00 ~ 200.00															
Carrier Frequency (kHz)	2 ~ 8 (default setting 2)															
Input Rating	Input Current (A)	Normal Duty														
		4.3	5.9	8.7	11	15.5	17	25	35	45	47	63				
		4.1	6.0	8.3	13	14.5	19	28	33	39	49	60				
	Rated Voltage / Frequency	3-phase AC 280 V ~ 480 V (-15% ~ +10%), 50/60Hz														
	Operating Voltage Range	323 ~ 525 V <sub>LL</sub>														
	Frequency Tolerance	±7 ~ 60Hz														
	Drive Weight (kg)	2.8 ± 0.3					5.4 ± 1					9.8 ± 1.5				
	Efficiency (%)	87.8														
	Power Factor	≥ 0.95														
	Cooling Method	Natural cooling							Fan cooling							
	Braking Chopper	Frame A, B, C: built-in; Frame D and above: optional														
	DC Choke	Frame A, B, C: optional; Frame D and above: built-in														
	EMC Filter	VFD000C40A: Optional; Frame A~G VFD000C40E: Built-in														
	EMC-DOP11	VFD000C40A: optional; VFD000C40E: built-in														

Figura C.7: Variador seleccionado C2000

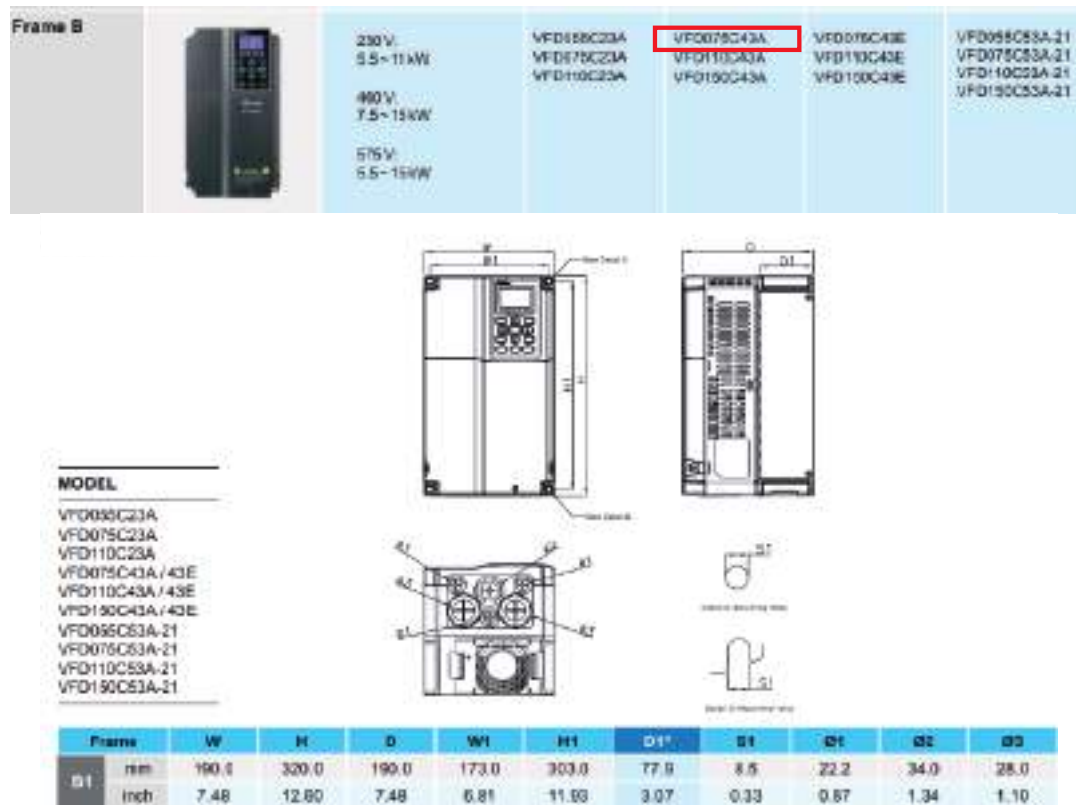



Figura C.8: Dimensiones de variador seleccionado C2000

El reactor está instalado entre el VFD y la fuente de energía, lo que limita la exposición a sobretensiones y fluctuaciones del sistema de energía. Los reactores pueden evitar disparos por sobrevoltaje, aumentar la confiabilidad y la vida útil del VFD, mejorar el factor de potencia total y reducir los disparos molestos. El reactor para este convertidor es:



kW	Frame	Applicable Model AFE-____A43A	Reactor Model	Inductance(mH)	Rated Current (Arms)
7.5	B	075	AF-RC075A4	7.32	20
15		150	AF-RC150A4	4.18	35
22	C	220	AF-RC220A4	2.92	50
37	D	370	AF-RC370A4	1.96	75
45		450	AF-RC450A4	1.54	95
75		750	AF-RC750A4	0.92	160

Figura C.9: Selección de reactor



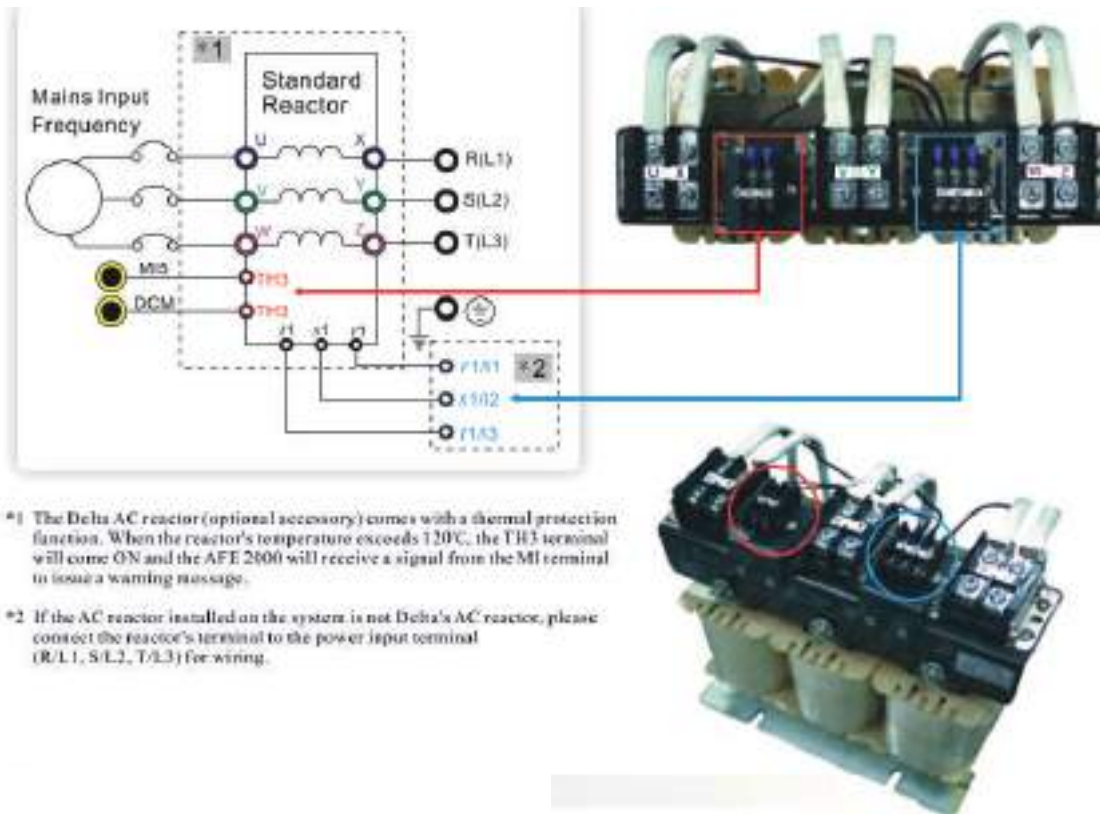


Figura C.10: Esquema de reactor

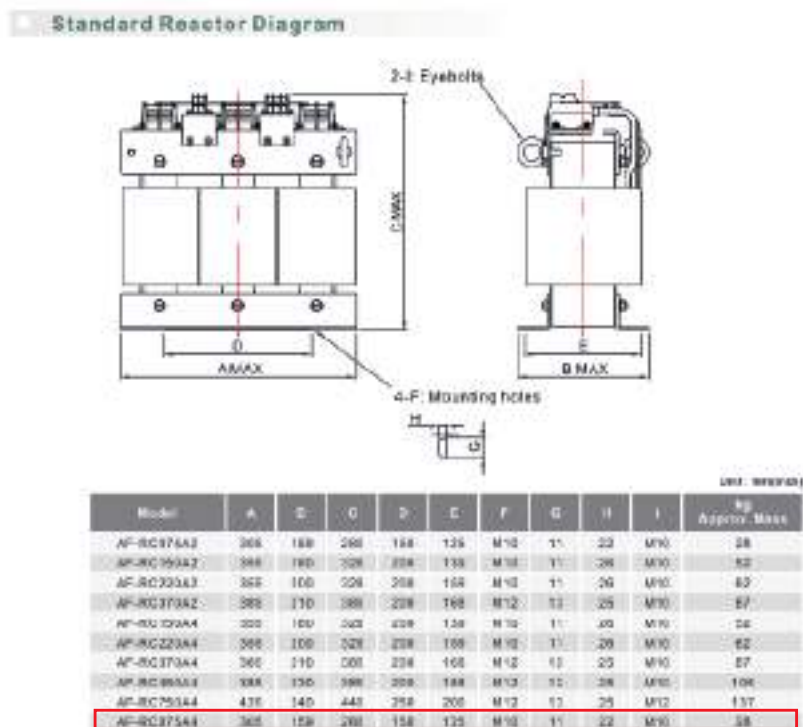


Figura C.11: Dimensiones de reactor

# Apéndice D

## Modelo Simulink de convertidor

A continuación se presenta el modelo utilizado en MatLab-Simulink para la simulación del sistema generador-convertidor PWM B2B. Se mostrará por partes las partes de dicho modelo, se utilizaron subsistemas basados en otros modelos de generadores hidráulicos.

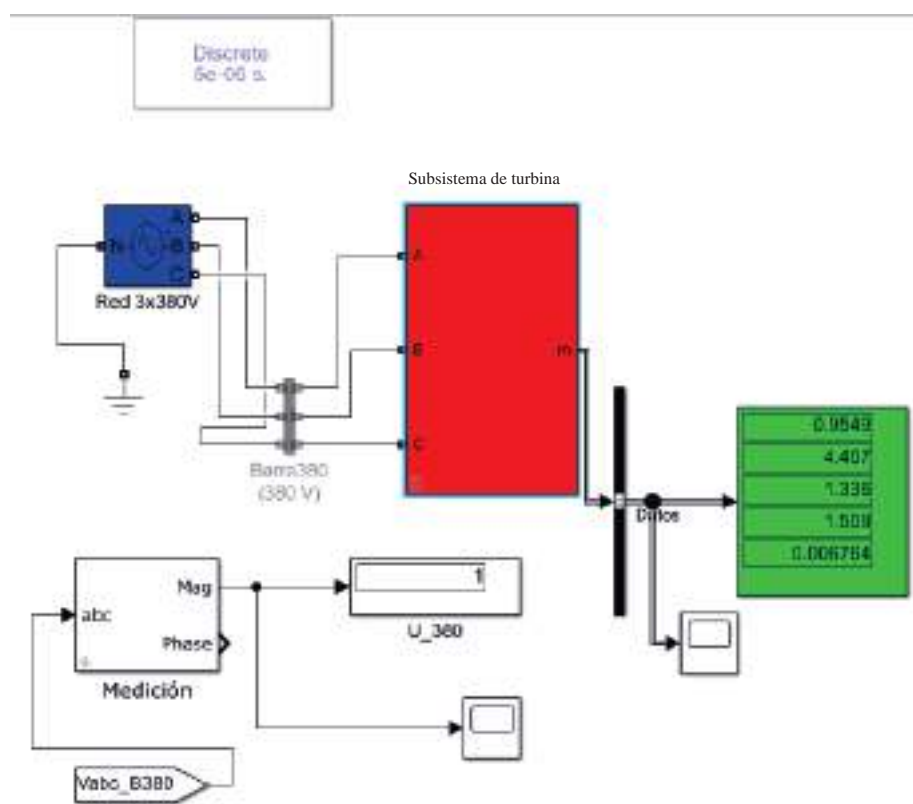


Figura D.1: Esquema de modelo de turbina-generador general. Fuente: [44] [36] [39] [40]

Dentro del subsistema de la turbina se encuentra el diagrama del convertidor y su control como se observa en la imagen D.2. Puede observarse el subsistema que tiene el modelo de la turbina en el que las variables de entrada son el caudal y altura.

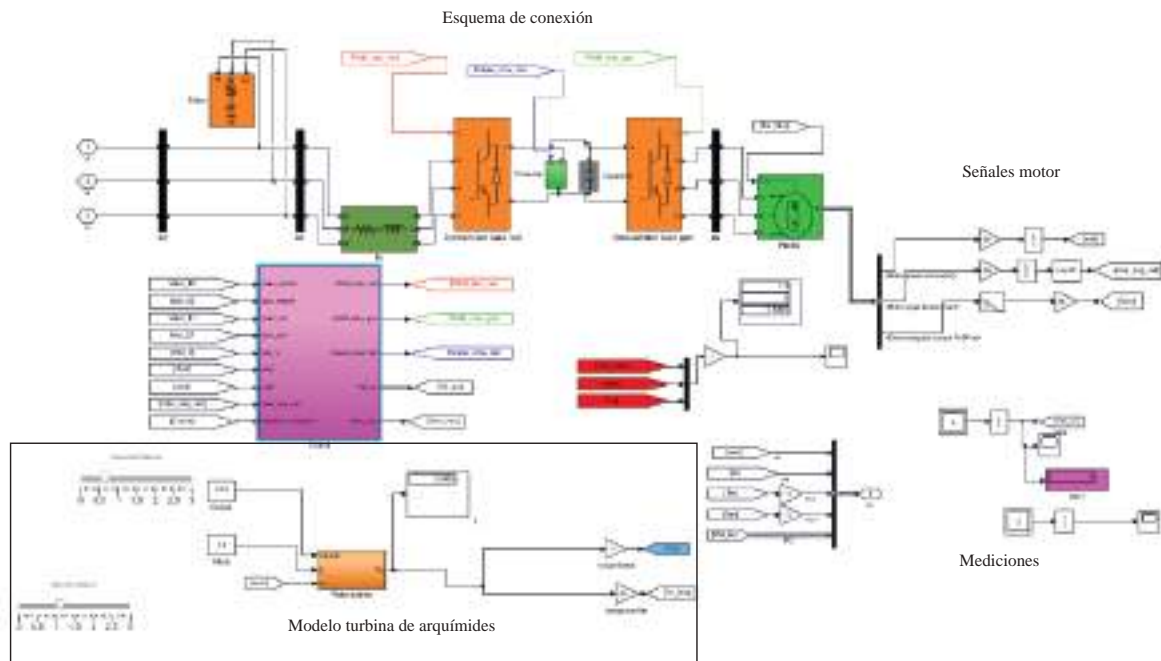


Figura D.2: Esquema de modelo de turbina-generador detallado. Fuente: [44] [36] [39] [40]

El bloque de la turbina de Arquímides contiene toda las variables del modelo, modificadas unicamente por las dos entradas (caudal y altura). Es de interés conocer y obtener el valor del torque saliente mecánico en el eje por lo que se realizó el siguiente modelo:

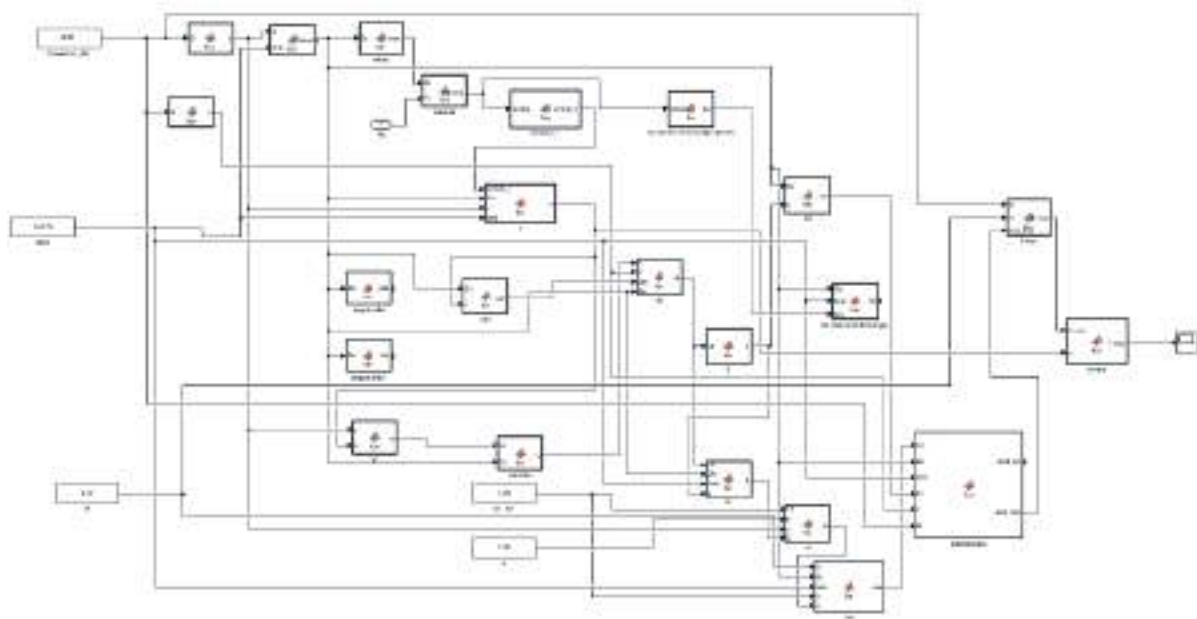


Figura D.3: Esquema de la turbina de Arquímedes. Fuente: Elaboración propia

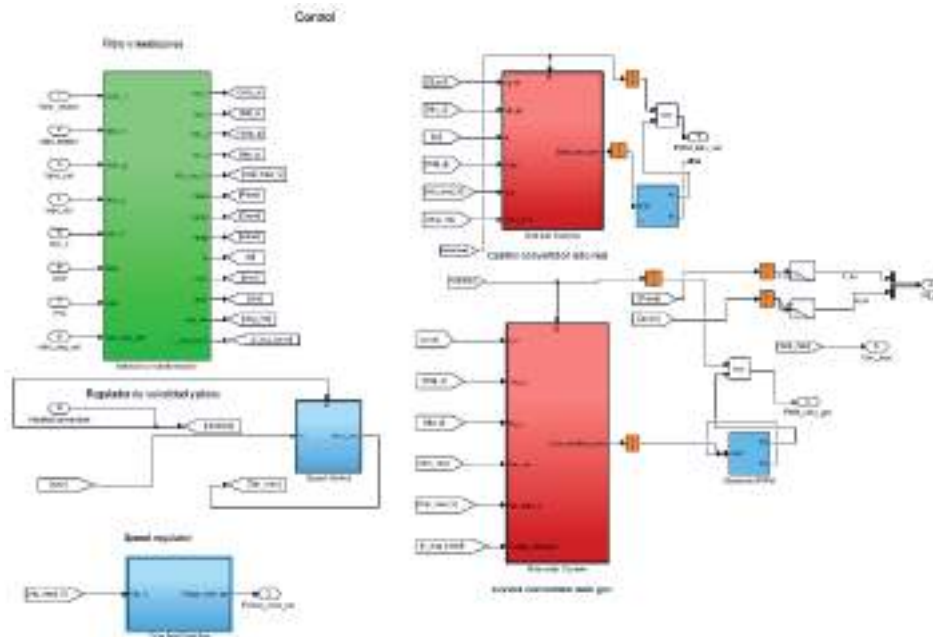


Figura D.4: Esquema de control PWM. Fuente: [44] [36] [39] [40]

Para las mediciones y control debe trabajarse y transformarse a  $dq$  las corrientes y voltajes:

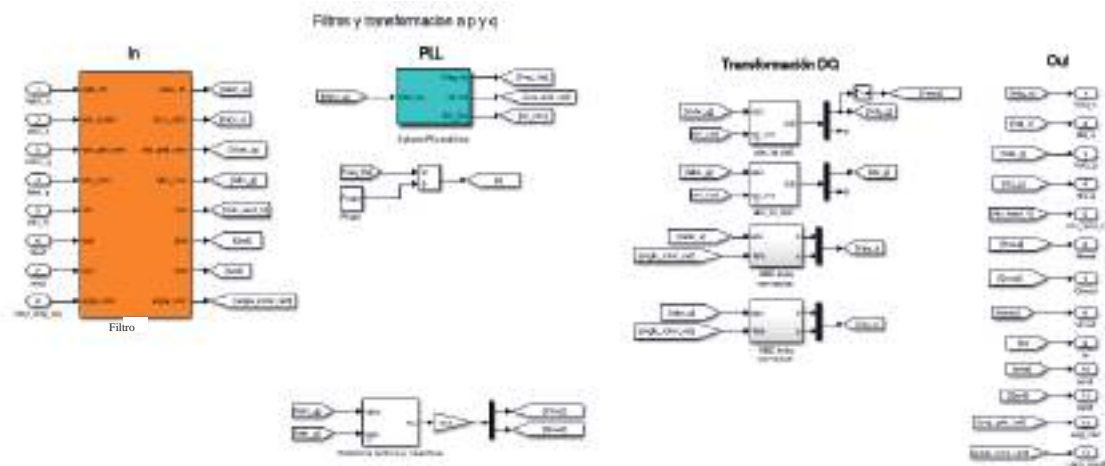


Figura D.5: Esquema de filtro y transformación. Fuente: [44] [36] [39] [40]

Los controles de lado red y lado generados se mostraran en la figura D.6 y D.7 donde se muestran los PI usados para el control.

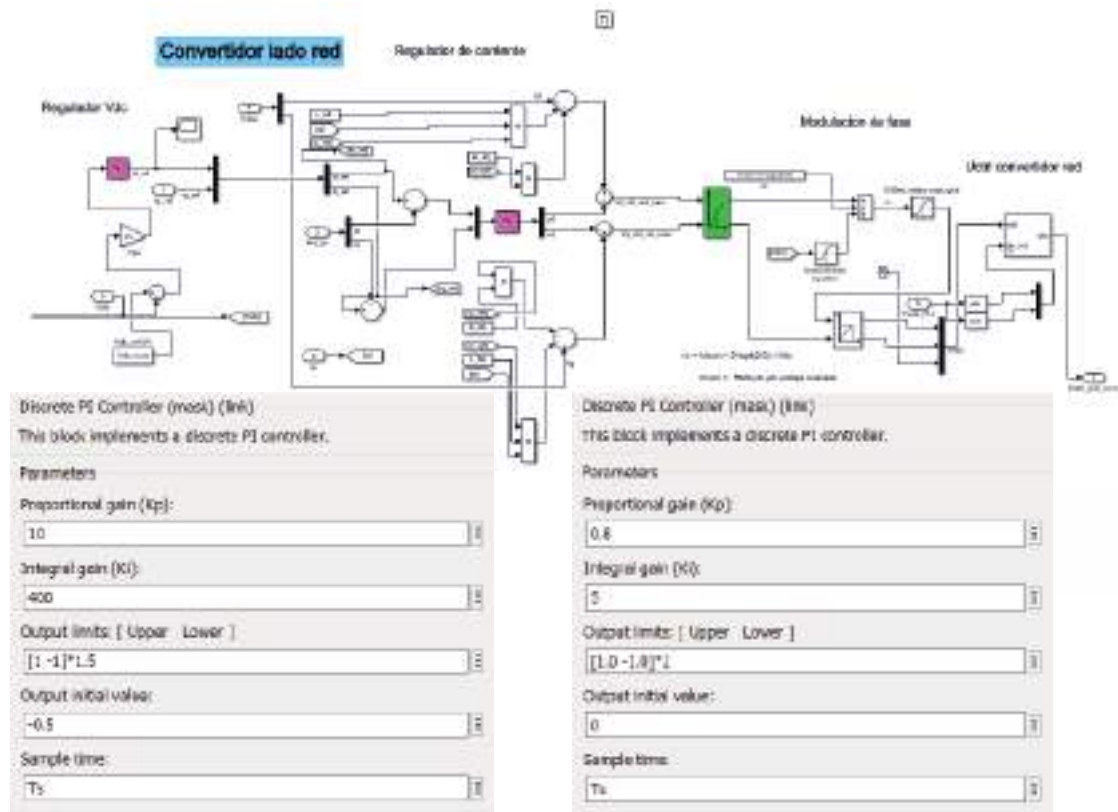


Figura D.6: Esquema de convertidor lado red. Fuente: [44] [36] [39] [40]



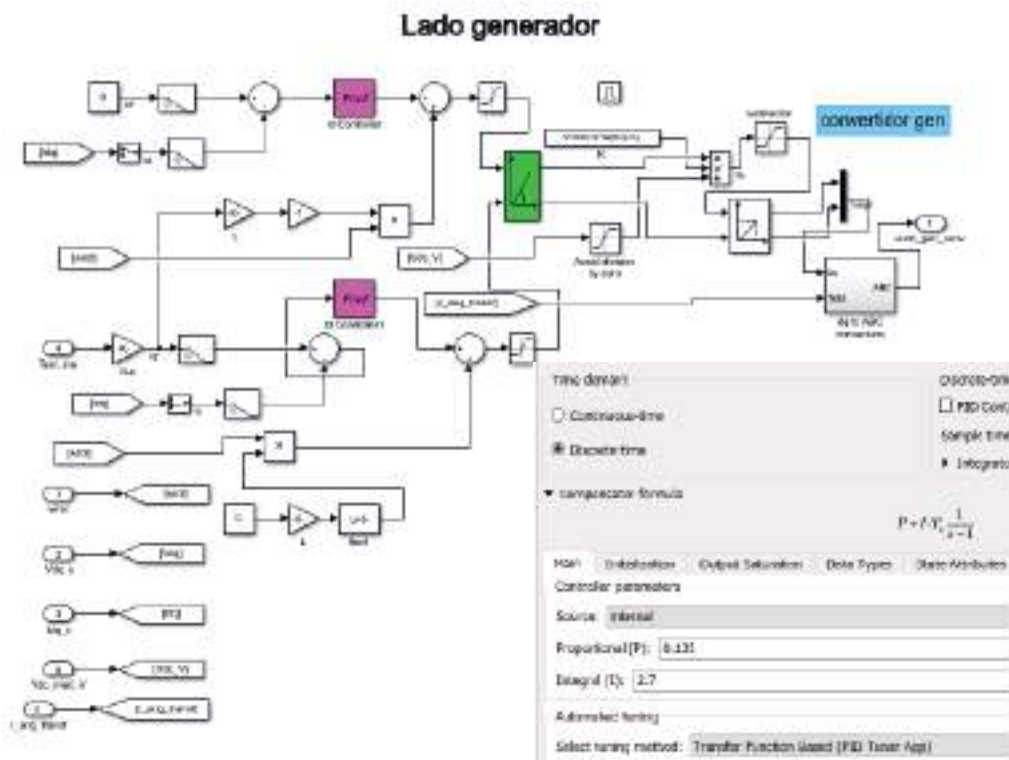


Figura D.7: Esquema de filtro y transformación. Fuente: [44] [36] [39] [40]



# Referencias

- [1] MINEM, “Hidroelectricidad en Argentina y en el Mundo”, 2020. [Online]. Available: <https://minem.gob.ar/www/844/26035/hidroelectricidad-en-argentina-y-en-el-mundo/>
- [2] Ing. Daniel Muguerza, “Micro-centrales Hidroeléctricas” ,pp. 5–8, 2003.
- [3] A. Kumar, T. Schei, A. Ahenkorah, R. Caceres Rodriguez, J.-M .Devernay, M. Freitas, D. Hall, Å. Killingtveit, Z. Liu. “Hydropower”*In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*,[O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.
- [4] Secretaría de Energía, “Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos” *Energías Renovables*, pp. 5–15, 2008.
- [5] Secretaría de Energía – República Argentina, “Centrales Eléctricas” , 2012.
- [6] CAMMESA, “Informe anual 2020” Available: <https://portalweb.cammesa.com/MEMNet1/Documentos%20compartidos/Informe%20Anual%202019%20v%20larga%2006Jun.pdf>, 2019.
- [7] P. F. Díez, “Turbinas hidráulicas”,departamento de ingeniería eléctrica y energética, Universidad de Catambria. [Online]. Available: <https://pfernandezdiez.es/es?pageID=19>,pp. 1–55, 2019.
- [8] I. G. Reyes, J. G. Bolaños Castillo, and F. J. González Villareal, “Balance hídrico de las presas Hoover y Glenn Canyon ubicadas sobre el cauce del río Colorado”, Instituto de Ingeniería, UNAM, Circuito Escolar S/N, Mexico. *XXVIII Congreso latinoamericano de hidráulica*, Buenos Aires, 2018.
- [9] J. J. Serra and M. J. Chachero, “Modelo de balance hídrico superficial de un sistema lagunar, caso 'Laguna Negra', Provincia de Chubut”, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco., vol. 17, pp. 60–76, 2011.

- [10] L. Caratori, H. Carlino, V. Gutman, A. Levi and E. Magnasco, “ Estudio sobre pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAH)”, *Proyecto de una NAMA*, Banco Interamericano de Desarrollo, División de Energía, Sector de Infraestructura y Medio Ambiente, nota técnica . 764 , pp. 27–51 , 2015.
- [11] G. Calderón, H. E. Massone and M. C. Sagua, “Caracterización preliminar del área serrana del sudeste bonaerense en el marco de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos”, *El caso de Sierra de los Padres (Municipio de Gral. Pueyrredón*, 2014.
- [12] Ministerio de Economía, “ENRE institucional”, Argentina. [Online]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/enre/quienes-somos>, 2020.
- [13] G. Sotelo, “Hidráulica general’, *Fundamentos*, Universidad Nacional Autónoma de México, Limusa Noriega editores, vol. 1, pp. 203–232, 1989.
- [14] A. Romanelli, O. M. Quiroz Londoño, H. E. Massone, D. E. Martinez and E. Bocanegra, “Groundwater in the hydrological functioning of wetlands in the Southeast of Buenos Aires Province, Argentina”, *Boletín Geológico y Minero*, Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Provincia de Buenos Aires, Argentina, 2010 vol. 7, pp. 53–74, 1963.
- [15] Secretaría de agricultura y recursos hídricos and Subsecretaría de infraestructura hidráulica, “Manual de diseño de estructuras de aforo” *Hydraulic Energy*, vol. 2, pp. 59–65, 1988.
- [16] Irwansyah, M. I. Maulana and A. Syuhada, “CDesign and Performance of Archimedes Single Screw Turbine as Micro Hydro Power Plant with Flow Rate Debit Variations” *Case Study in Air Dingin, Samadua - South Aceh*, *Jurnal Inovasi Teknologi dan Rekayasa*, doi: 10.31572/inotera.Vol4.Iss1.2019.ID71, vol. 4, pp. 11–13, 2019.
- [17] O. M. Quiroz Londoño, A. Romanelli, D. E. Martinez and H. E. Massone, “Water exchange processes estimation in a temperate shallow lake based on water stable isotope analysis” *Isotopes in Environmental and Health Studies*, DOI: 10.1080/10256016.2020.1803857, vol. 56, 2020.
- [18] CAMESSA institucional, “Diagrama organizacional y estructural de CAM-MESA”, [Online]. Available: <https://portalweb.cammesa.com/Pages/Institucional/defaultinstitucional.aspx>, 2019.
- [19] H. E. Massone, O. M. Quiroz Londoño, A. Romanelli and F. Donna, “Proyecto watercliam LAC 2015-2017” *Compilación de informes técnicos producidos en el Área Piloto Mar del Plata*, Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario

- (IGCyC-UNMdp/CIC) and Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC-UNMdp/CONICET), Guía didáctica 3, 2017.
- [20] Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas, “Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento” *Subdirección general técnica*, pp. 31–61, 2002.
- [21] P. P. Pantoja, “Proyecto de microgeneración con turbina Kaplan” *TES IS PUCP*, Universidad católica de Perú, 2006.
- [22] M. F. Piegari and P. Bereciartua, “Abastecimientos sustentable de energía a regiones rurales aisladas. Análisis de generación de energía hidroeléctrica de paso utilizando un tornillo de Arquímedes” *CREEDS*, , pp. 7–56, 2010.
- [23] C. Rorres, “The turn of the screw: optimal design of an archimedes screw” in *Journal of hydraulic engineering.*, 126(1), doi: ASCE, ISSN 0733-9429/00/0001-0072–0080 pp. 72–80.
- [24] D. Nuernbergk, C. Rorres “Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation” in *Journal of hydraulic engineering* . 139. 213-220, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000661, 2013.
- [25] A. YoosefDoost and M. F. Piegari, “Archimedes screw turbines: a sustainable development solution for green and renewable energy generation — A review of potential and design procedures” in *Sustainability*. School of Engineering, University of Guelph, Guelph, ON N1G 2W1, Canada, 2020.
- [26] G. Nagel, “Archimedean screw pump handbook.” in *Fundamental aspects of the design and operation of water pumping installations using Archimidean screw pumps* , Ritz-Atro Pumpwerksbau GMBH Roding. School of Engineering, Nürnberg, Germany, 1968.
- [27] Renewable First, “Archimedean screw hydro turbine” in *Hydropower Learning Centre* , ONLINE: <https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/archimedean-screw-hydro-turbine/>, 2019.
- [28] W. D. Lubitz, M. Lyons and S. Simmons, “Performance Model of Archimedes Screw Hydro Turbines with Variable Fill Level” in *Journal of Hydarulic Engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000922, 2014.
- [29] G. Müller and J. Senior, “Simplified theory of Archimedean screws” in *Journal of Hydraulic Research*, 47:5, 666-669, doi: 10.3826/jhr.2009.3475, 2014.

- [30] A. Lashofer, W. Hawle, I. Kampel and F. Pelikan, “State of technology and design guidelines for the archimedes screw turbine” in *Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering*, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Muthgasse 18, A-1190 Vienna, 2012.
- [31] G. Dellinger, P. A. Garambois, M. Dufresne, A. Terfous, J. Vazquez and A. Ghennaim, “Numerical and experimental study of an Archimedean Screw Generator” in *Journal of Hydraulic Research*, Conf. Series: Earth and Environmental Science, 49, doi:10.1088/1755-1315/49/10/102002, 2016.
- [32] J. C. Mejía, “Diseño de una turbina hidráulica basada en un tornillo de Arquímedes”, Ciudad Universitaria de el Salvador, 2011.
- [33] G. Dellinger, ‘Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d’Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques’, Construction hydraulique. Université de Strasbourg, 2015.
- [34] N. Bravo, “Sistema de conversión mecánica y eléctrica (generador undimotriz)”, Universidad de Chile. Facultad de ciencias física y matemáticas, 2008.
- [35] Z. Jiang, “Power conversion system for grid connected micro hydro power system with maximum power point tracking” in *Theses ans dissertations*, University of Wisconsin Milwaukee, 2017.
- [36] M. Penalba and J. Cortagarena and J. Ringwood, “Validating a wave-to-wire model for a wave energy converter” in *energies*, Centre for Ocean Energy Research (Maynooth University), Engineering School of Eibar, University of the Basque Country, 20600 Eibar, Spain; , 2017.
- [37] L. Quéval and H. Ohsaki, “Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines”, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012), Nagasaki, Japan, November 2012.
- [38] B. Guo, S. Bacha, M. Alamir, A. Mohamed and C. Boudinet, “BLADRC applied to variable speed micro-hydro plants: experimental validation”, University Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G2Elab, F-38000 Grenoble, France., February 2019.
- [39] R. Teodorescu, M. Liserre and P. Rodriguez, “Grid converters for photovoltaic and wind power systems”, John Wiley and Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2011.
- [40] A. Carlsson, “The back to back converter control and design”, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology, Sweden, May 1998.

- [41] O. Kalmbach, C. Dirscherl and C. M. Hackl “Discrete-Time DC-Link Voltage and Current Control of a Grid-Connected Inverter with LCL-Filter and Very Small DC-Link Capacitance’, Journal: ”energies”, MDPI, 27 October 2020.
- [42] Y. Thurel, “Switched Mode Four-Quadrant Power Converters”, Published by CERN in the Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Power Converters, Baden, Switzerland, 2014, edited by R. Bailey, CERN-2015-003, 2015.
- [43] Ansys Inc Fluent material database library, ANSYS Mechanical APDL Material Reference, outhpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317.
- [44] X. Ruan, “Soft- Switching PWM Full-Bridge converters: topologies, control and design”, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China, April 2014.
- [45] Otero aceros, “ACEROS AL CARBONO”, [https://www.cad-cae.com/PDF\\_CAD\\_CAE/Aceros\\_para\\_mecanizado.pdf](https://www.cad-cae.com/PDF_CAD_CAE/Aceros_para_mecanizado.pdf), Quilicura, Concepción, 2021.
- [46] C. Mussano, “Cálculo de elementos de maáquinas, Árboles y ejes”, Facultad de Ingeniería , Argentina, 2019.
- [47] Grupo SKF 2019, “Catálogo rodamientos”, PUB BU/P1 17000/1 ES · Enero 2019.
- [48] F. Ramella y M. García Iza “Prediseño de micro-turbina hidráulica para uso rural”, Trabajo Final de la Carrera Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mayo 2016.
- [49] R. Fitzgerald, “Mecánica de materiales”, Worcester Polytechnic Institute, Edición revisada, Alfaomega. Décimosexta reimpresión: M2» ico, 1996.
- [50] CYPE Ingenieros S.A, “Generador de precios. Espacios Urbanos”, [Online]. Available: <http://www.argentina.generadordeprecios.info/>, Análisis de precio ACE015.
- [51] J. Ureña, “Estudio de costos de implementación de sistemas pico y micro hidro-eléctrica (100W a 100 KW).” (tesis Inédita de licenciatura), Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica, San Jose, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- [52] M. Manin, Ente nacional regulador de electricidad, “Resolución 107/2021”. [Online]. Available: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/5292298/20210430?suplemento=1>, VISTO el Expediente N° EX-2021-04177771-APN-SDENRE, y, Ciudad de Buenos Aires, 30/04/2021.
- [53] Banco Nacion, Información al Usuario Financiero. [Online]. Available: <https://www.bna.com.ar/Home/InformacionAlUsuarioFinanciero>, Tasa Activa Cartera General Diversas,vigente desde el 15/10/2021, Argentina, 2021.

- [54] V. Conesa Fernandez-Vitora, "Guia metodológica para la evaluación del impacto ambiental". Journal: "Ingeniería Sanitaria ambiental", Mundi Prensa, Fi-UNE, Argentina, Noviembre 2006.