



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Metodología de diseño de sistemas de cosecha de
energía hidráulica a partir del uso de microturbinas
hidrocinéticas**

presentada por

Ing. Fher Said Macedo García

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel

Codirector de tesis

Dr. Manuel Rico Secades

Cuernavaca, Morelos, México. Mayo de 2024.



Cuernavaca, Mor.,

09/mayo/2024

No. de Oficio:

DIE/035/2024

Asunto:

Aceptación de documentos de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Fher Said Macedo García , con número de control M22CE017 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Metodología de Diseño de Sistemas de Cosecha de Energía Hidráulica a partir del uso de Microturbinas Hidrocinéticas", y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 0988229

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Manuel Rico Secades
Doctor Ingeniero Industrial
Cédula profesional 735
(Colegio Oficial de Ingenieros
Industriales de Asturias)

REVISOR 1

Dra. Susana Estefany De León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 10458245

REVISOR 2

Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 7980044

Cp: MTI María Elena Gómez Torres, Jefe del Departamento de Sellos Escolares
Estadística
JCM/kmqn



Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

16/mayo/2024
SAC/169/2024
**Autorización de
impresión de tesis**

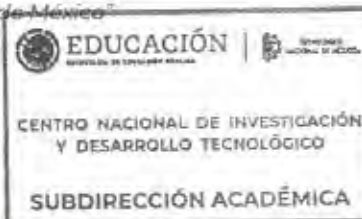
FHER SAID MACEDO GARCÍA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Metodología de Diseño de Sistemas de Cosecha de Energía Hidráulica a partir del uso de Microturbinas Hidrocinéticas”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz

Dedicatoria

A mi madre Keila García, quien ha sido una pieza fundamental en mi desarrollo como profesionista y ser humano a lo largo de la vida, y que conozco cada uno de sus sacrificios que ha hecho en su vida por sus hijos, esto es para ella.

A mi padre Fernando Macedo, quien me ha demostrado algunos valores como persona, y el valor de las cosas desde una perspectiva subjetiva, así como el apoyo brindado durante mi formación académica.

A mi hermano Damian Macedo, quien a pesar de ser menor que yo, es un ejemplo a seguir y me motiva también en el ámbito personal y académico.

A mi prometida Jaqueline Hernández, quien con el tiempo que hemos pasado juntos, hemos evolucionado en todos los ámbitos y que ha sido clave en muchas circunstancias de mi vida personal, profesional, familiar y académica, en la transición de una manera más humana.

A las personas que han creído y confiado en mí a lo largo de este cuarto de siglo, como amigos del COBAEM 01, UTEZ, CENIDET y familiares.

Y a mí, quien pese a las adversidades que solo pocos conocen, he podido llegar a estar punto como un escalón más para alcanzar el objetivo de vida planeado.

Agradecimientos Parte I

A Dios, por permitirme llegar al sitio donde hoy me encuentro y estar presente en cada circunstancia.

A mi madre Keila Yalilee García y mi padre Fernando Nicolás Macedo, por estar presentes en este logro y el apoyo que cada quien me pudo brindar.

A mi hermano Damian Macedo, por ser un ejemplo a seguir como estudiante y como ser humano aun siendo menor que yo.

A mi prometida, Jaqueline Hernández, quien ha sido una pieza clave y elemental en mi desarrollo personal, profesional y humano.

A mi director de tesis, el Dr. Jaime Arau, de quien aprendí distintas cosas que tendré presente en mi vida profesional y personal, así como admiración por su amplia trayectoria en múltiples ámbitos, y de quien me apoyé durante todo el desarrollo de mi tesis, como de cada etapa del proceso de maestría.

A mi codirector de tesis, el Dr. Manuel Rico Secades, quien admiro profundamente y quien me transmitió un poco de su amplio conocimiento, así como todo el apoyo brindado de diferentes formas en mi estancia de investigación en España.

A mis revisores de tesis, el Dr. Luis Gerardo Vela y la Dra. Susana De León Aldaco, quienes, gracias a sus comentarios y sugerencias en las presentaciones de avance periódicas, pude culminar satisfactoriamente este proceso.

A los profesores-investigadores del Departamento de Ingeniería Electrónica (DIE), con quienes tuve la oportunidad de interactuar o de tomar clases, y de quienes siento admiración por su amplia experiencia y conocimientos de diferentes áreas de investigación.

Agradecimientos Parte II

Al grupo CE3I2 (alumnos y profesores) de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón y el grupo de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres (Universidad de Oviedo, España) con quienes interactué en mi estancia de tres meses, me apoyaron de múltiples formas y de quienes adquirí admiración por el conjunto de logros que tienen, tanto de forma individual como de forma grupal, así como de cultura, gastronomía y costumbres de su país de donde tuve una experiencia muy grata e inolvidable.

A mis compañeros de generación y de generaciones delante y detrás de la mía de diferentes líneas de investigación y departamentos por hacer más agradable mi estancia en este proceso de maestría.

Al Tecnológico Nacional de México, Campus: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, por permitirme ser parte de esta institución y cursar la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Energías Renovables y Eficiencia Energética.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia Y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada para los 24 meses transcurridos en el desarrollo de esta tesis de maestría.

Resumen

En el mundo actual, existe un amplio interés por el uso de energías renovables como fuente de generación de energía, esta tendencia permite cubrir con distintas necesidades, y deriva a ventajas de múltiples tipos, como ambientales, económicas y sociales.

Ante esta tendencia global, nos encontramos con algunas problemáticas específicas que se tienen en común de forma general, por lo cual las energías renovables buscan solucionar dichas situaciones, una de ellas, es que en México aún existen viviendas rurales que se encuentran aisladas de la red eléctrica, y no tienen acceso a este importante servicio, razón por la cual, se han buscado estrategias para cubrir con esta situación.

Como alternativa de generación de energía ya se ha encontrado viable el uso de la energía solar, eólica e hidráulica. Enfocándonos en este último tipo de energía, tenemos plantas hidroeléctricas o el uso de turbinas tradicionales, sin embargo, en la última década ya se han encontrado como una opción más práctica y con ventajas adicionales el uso de microturbinas hidrocínéticas, ya sea colocadas en ríos o canales de riego, por lo que se han realizado grandes esfuerzos de investigación en torno a la ingeniería, ciencia y tecnología detrás de este tipo de sistemas de cosecha de energía, los cuales permitirían la electrificación de casas rurales aisladas de la red eléctrica; por lo que resulta de amplio interés contar con una guía de diseño de este tipo de sistemas.

El presente trabajo aborda una metodología de diseño de este tipo de sistemas de cosecha de energía hidráulica utilizando como fuente primaria de energía las turbinas hidrocínéticas de eje vertical, abordando cada uno de sus elementos y validando el sistema mediante el software de diseño electrónico LTspice.

Abstract

Currently, exists a wide interest in the use of renewable energies as a source of energy generation, this trend allows to cover different needs, and derives to advantages of multiple types, such as environmental, economic and social.

Taking into account this global trend, has been found with some specific problematics that are common in general form, so renewable energies seek to solve these situations, one of these, is that in Mexico there are still rural houses that are isolated from the electricity grid, and they do not have access to this important service, reason for which strategies have been sought to deal with this situation.

As an alternative for power generation has already been found feasible the use of solar, eolic wind and hydraulic energy. Focusing on this last type of energy, we have hydroelectric plants or the use of traditional turbines, but in the last decade have already been found the use of hydrokinetic microturbines either installed in rivers or water canals, so have been carried out great efforts of investigation around of engineering, science and technology, behind of this type of energy harvesting systems which would allow the electrification of rural houses isolated from the power grid, It is therefore of great interest to have a design guide for this type of systems.

This work shows a design methodology for this type of hydraulic energy harvesting systems using vertical axis hydrokinetic turbines as the primary energy source, analyzing each of its elements and validating the system using LTspice electronic design software.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	2
1.1- Antecedentes	4
1.2- Planteamiento del problema	5
1.3- Objetivos	5
1.3.1- General	5
1.3.2- Específicos	6
1.4- Justificación	6
1.5- Alcances y limitaciones	6
1.6- Organización del documento de tesis	7
Capítulo 2. Marco Teórico y Revisión del Estado del Arte	10
2.1.- Sistemas de cosecha de energía	10
2.2.- Sistemas de cosecha de energía hidráulica	12
2.3.- Turbinas hidrocínéticas	13
2.3.1.- Tipologías de turbinas hidrocínéticas	13
2.4.- Generador de Imanes Permanentes (PMG)	16
2.5.- Convertidores CD/CD	17
2.5.1.- Convertidores sin aislamiento	18
2.5.2.- Convertidores con aislamiento	19
2.6.- Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE)	20
2.6.1.- Baterías	21
2.6.2.- Supercondensadores	22
2.6.3.- Volantes de inercia	23
2.6.4.- Celdas de combustible	23
2.6.5.- Bombeo de agua	24
2.7.- Algoritmo del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT)	25
2.8.- Software de validación del comportamiento del diseño	25
2.9.- Revisión del estado del arte	26
2.10.- Turbinas hidrocínéticas de eje vertical	26

2.11.- Sistemas de cosecha de energía hidráulica	28
2.12.- Metodologías de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica	29
2.13.- Softwares para modelado de turbinas	29
2.14.- Conclusiones del estado del arte	30
Capítulo 3. Metodología de Diseño Propuesta	34
3.1.- Introducción metodología de diseño	34
3.2.- Alcances y limitaciones de la metodología.....	36
3.3.- Etapa 1 – Perfil de consumo	38
3.3.1.- Análisis de equipos eléctricos con los que cuenta la vivienda.....	38
3.3.2.- Perfil de consumo de la vivienda.....	39
3.4.- Etapa 2 - Estimación del recurso hídrico.....	42
3.4.1.- Especificaciones y consideraciones (campo abierto)	42
3.4.2.- Especificaciones y consideraciones (espacios semicerrados)	47
3.5.- LTspice para creación de modelos en la metodología	51
3.6.- Etapa 3 - Caracterización de turbina.....	55
3.6.1.- Elementos mecánicos de la turbina.....	57
3.6.2.- Incorporación de par de arranque.....	59
3.6.3.- Modelo LTspice campo abierto.....	60
3.7.- Etapa 4 – Caracterización de caja de engranes y PMG.....	63
3.7.1.- Modelo LTspice caja de engranes.....	64
3.8.- Caracterización del generador de imanes permanentes (PMG)	66
3.8.1.- Criterios importantes para su caracterización.....	67
3.8.2.- Modelo LTspice PMG	68
3.9.- Etapa 5 - Criterios para selección de batería.....	70
3.9.1.- Entorno	72
3.9.2.- Tecnología a utilizar	73
3.9.3.- Autonomía del sistema.....	74
3.9.4.- Tensión de trabajo y ciclos de vida	75
3.10.- Etapa 6 - Electrónica de potencia asociada.....	75
3.10.1.- Convertidor CA/CD (rectificador)	76
3.10.2.- Selección del convertidor CD/CD	79
3.10.3.- Control MPPT del convertidor.....	82
3.11.- Sistema de cosecha de energía completo	87

3.12.- Conclusiones y discusión de metodología de diseño	87
Capítulo 4. Validación de la Metodología y Resultados	90
4.1.- Introducción validación de metodología	90
4.2.- Caso río de bajo cauce con uso de batería.....	91
4.2.1.- Modelo LTspice validación de caso 1	91
4.3.- Caso canal de riego con batería.....	93
4.3.1.- Modelo LTspice validación de caso 2	93
4.4.- Caso canal de riego optimizando tamaño batería.....	95
4.4.1.- Modelo LTspice validación de caso 3	95
4.5.- Caso canal de riego sin uso de batería	97
4.5.1.- Modelo LTspice validación de caso 4	97
4.7.- Comparación y discusión de resultados de validación de metodología de diseño.....	99
4.8.- Conclusiones de validación de metodología.....	100
Capítulo 5. Conclusiones	102
5.1.- Aportaciones	102
5.2.- Trabajos futuros	104
5.3.- Productos académicos	105
Referencias	107
Anexos.....	113

Lista de figuras

Figura 1.1 Diagrama del sistema de cosecha de energía que aborda la tesis.	3
Figura 2.1 Ejemplo de un sistema de cosecha de energía.	11
Figura 2.2 Elementos clave en los sistemas de cosecha de energía.	11
Figura 2.3 Ejemplo de sistema de cosecha de energía hidráulica.	13
Figura 2.4 Ejemplo de turbina HAWT [18].	14
Figura 2.5 Ejemplo de turbina VAWT.	14
Figura 2.6 Ejemplo de convertidor CD/CD de topología elevadora (Boost Converter).	17
Figura 2.7 Ejemplo de convertidor CD/CD sin aislamiento (Buck-Boost Converter).	19
Figura 2.8 Ejemplo de convertidor CD/CD con aislamiento de tipo Flyback.	20
Figura 2.9 Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) principales.	21
Figura 2.10 Clasificación de baterías de acuerdo a su tecnología.	21
Figura 2.11 Esquema de un supercondensador [26]	22
Figura 2.12 Esquema de un volante de inercia.	23
Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología de diseño.	35
Figura 3.2 Clasificación de casos de estudio de la metodología de diseño.	37
Figura 3.3 Perfil de consumo patrón de la vivienda rural en 24 horas.	39
Figura 3.4 Perfil de consumo con diferentes capacidades de generación.	40
Figura 3.5 Curvas de potencia teórica y real extraíble en campo abierto.	45
Figura 3.6 Coeficiente de potencia (ajuste hidrodinámico).	46
Figura 3.7 Esquema de un canal de agua rectangular con turbina bajo ensayo.	47
Figura 3.8 Coeficiente de potencia extendido (Cpx).	49
Figura 3.9 Coeficiente de potencia extendido (Cpx).	50
Figura 3.10 Coeficiente de potencia extendido (Cpx).	50
Figura 3.11 Panel principal LTspice	52
Figura 3.12 Creación de nuevo modelo.	52
Figura 3.13 Conjunto de barras en LTspice	53
Figura 3.14 Creación de nuevo símbolo en LTspice.	54
Figura 3.15 Directorio de modelos LTspice.	54
Figura 3.16 Conjunto de componentes y herramientas LTspice para creación de modelos	55
Figura 3.17 Diagrama de acoplamiento de elementos mecánicos del sistema.	58

Figura 3.18 Diagrama de acoplamiento de elementos mecánicos del sistema con símiles eléctricos.....	58
Figura 3.19 Modelo de elementos mecánicos turbina e incorporación de par de arranque.	59
Figura 3.20 Modelo turbina (campo abierto) en LTspice parte interna.	60
Figura 3.21 Modelo turbina en LTspice parte externa.....	61
Figura 3.22 Ejemplo de señal obtenida de la turbina (C_p respecto a TSR).	62
Figura 3.23 Modelo turbina (canal de agua) en LTspice parte interna.....	62
Figura 3.24 Modelo caja de engranes en LTspice parte externa.	65
Figura 3.25 Modelo caja de engranes en LTspice parte interna.	65
Figura 3.26 Modelo <i>PMG</i> en LTspice parte interna.	68
Figura 3.27 Modelo <i>PMG</i> en LTspice parte externa.....	69
Figura 3.28 Acoplamiento turbina + <i>PMG</i>	69
Figura 3.29 Corriente alterna trifásica de salida del <i>PMG</i>	70
Figura 3.30 Criterios para selección de batería.	72
Figura 3.31 Modelo turbina- <i>PMG</i> en LTspice con la incorporación de rectificador.	76
Figura 3.32 Tensión de salida del rectificador.....	77
Figura 3.33 Modelo <i>PMG</i> con rectificador simplificado en LTspice.....	78
Figura 3.34 Modelo turbina con <i>PMG</i> y rectificador simplificado en LTspice.....	78
Figura 3.35 Modelo convertidor CD/CD simplificado en LTspice (caso sin batería).	81
Figura 3.36 Modelo 2 convertidor CD/CD simplificado en LTspice (tres casos con batería.	81
Figura 3.37 Modelo turbina, <i>PMG</i> , rectificador y convertidor CD/CD en LTspice.....	82
Figura 3.38 Lógica para programar la máquina de estados para el cuasi MPPT en LTspice.	84
Figura 3.39 Aproximación al cuasi-MPPT a partir de la medida de la frecuencia.....	85
Figura 3.40 Modelo máquina de estados en LTspice para cuasi-MPPT.	85
Figura 3.41 Modelo máquina de estados en LTspice para cuasi-MPPT.	86
Figura 3.42 Modelo conjunto de casi todos los elementos sin batería.....	86
Figura 3.43 Sistema de cosecha de energía hidráulica completo.	87
Figura 4.1 Validación LTspice campo abierto (río de bajo cauce) con batería.	91
Figura 4.2 Gráficos validación LTspice campo abierto (río de bajo cauce) con batería..	92
Figura 4.3 Validación LTspice canal de riego con batería.....	93
Figura 4.4 Gráficos validación LTspice canal de riego con batería.	94
Figura 4.5 Validación LTspice canal de riego optimizando tamaño batería.....	95
Figura 4.6 Gráficos validación LTspice canal de riego optimizando tamaño de batería.	96

Figura 4.7 Validación LTspice canal de riego sin uso de batería.	97
Figura 4.8 Validación LTspice canal de riego sin uso de batería.	98

Lista de tablas

Tabla 1: Equipos eléctricos y consumo de la vivienda rural aislada.	39
Tabla 2: Datos propuestos para comparativa campo abierto y canal de agua.....	49
Tabla 3: Criterios importantes para caracterización de turbina.	56
Tabla 4: Criterios importantes para caracterización de caja de engranes.....	64
Tabla 5: Criterios importantes para caracterización de generador de imanes permanentes	67
Tabla 6: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (campo abierto) con batería.....	91
Tabla 7: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) con batería.....	93
Tabla 8: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) optimizando batería.....	95
Tabla 9: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) sin batería.....	97

Simbología

<i>Ae</i>	Área de agua a la entrada del canal (m ²)
<i>As</i>	Área de agua a la salida del canal (m ²)
<i>b</i>	Base del canal (m)
<i>C</i>	Capacitancia (f)
<i>Ek</i>	Energía cinética del agua (J)
<i>F</i>	Coefficiente de Rozamiento (Nms/rad)
<i>Fe_arra</i>	Frecuencia eléctrica arranque (Hz)
<i>Fe_min</i>	Frecuencia eléctrica mínima (Hz)
<i>Fe_vacío</i>	Frecuencia eléctrica vacío (Hz)
<i>Fm</i>	Coefficiente de Rozamiento del Motor (Nms/rad)
<i>Ft</i>	Coefficiente de Rozamiento de la Turbina (Nms/rad)
<i>g</i>	Gravedad (9.81 m/s ²)
<i>h</i>	Altura (m)
<i>he</i>	Altura del agua a la entrada del canal (m)
<i>hs</i>	Altura del agua a la salida del canal (m)
<i>I</i>	Corriente (A)
<i>Ie_ref</i>	Corriente de entrada de referencia (A)
<i>Ieqv_cal</i>	Corriente equivalente calculada (A)
<i>Ieqv_ref</i>	Corriente equivalente de referencia (A)
<i>J</i>	Momento de Inercia (Kg/m ²)
<i>Jt</i>	Momento de Inercia Turbina (Kg/m ²)
<i>Jm</i>	Momento de Inercia Motor (Kg/m ²)
<i>Kv</i>	Coefficiente de voltaje – velocidad del PMG (V/krpm)
<i>kWh</i>	Kilowatt hora
<i>kWh/día</i>	Kilowatt hora entre día
<i>Lf</i>	Inductancia de fase (H)
<i>Pot</i>	Potencia total del agua (W)
<i>Patm</i>	Presión atmosférica (Pa)
<i>Pe</i>	Presión de agua a la entrada del canal (Pa)
<i>Pelec</i>	Potencia eléctrica (W)

<i>Pr</i>	Potencia Fase R (W)
<i>Ps</i>	Potencia Fase S (W)
<i>Pt</i>	Potencia Fase T (W)
<i>Pex</i>	Potencia extraíble (W)
<i>Pm</i>	Potencia Mecánica Útil (W)
<i>Pteo</i>	Potencia Teórica (W)
<i>Qe</i>	Caudal de entrada (m ³ /s)
<i>Qs</i>	Caudal de salida (m ³ /s)
<i>R</i>	Radio (m)
<i>rad</i>	Radianes
<i>Rf</i>	Resistencia de fase (Ohms)
<i>ro ó ρ</i>	Densidad del agua (Kg/m ³)
<i>S_ref</i>	Salida de referencia
<i>TSR ó λ</i>	Relación punta-velocidad (adimensional)
<i>TSR_óptima</i>	Relación Punta-Velocidad Óptima (adimensional)
<i>TSR_vacío</i>	Relación Punta-Velocidad Vacío (adimensional)
<i>TSR_min</i>	Relación Punta-Velocidad Mínima (adimensional)
<i>Tmec</i>	Par mecánico (Pm * ω _m)
<i>Ve</i>	Velocidad de entrada del agua (m/s)
<i>Vf</i>	Velocidad del fluido (m/s)
<i>Vs</i>	Velocidad de salida del agua (m/s)
<i>Vo</i>	Voltaje salida (V)
<i>Vo_avg</i>	Voltaje de salida promediado (V)
<i>ω</i>	Velocidad angular (rad/seg)
<i>ω_m</i>	Velocidad angular del eje de la turbina (rad/seg)
<i>ω_e</i>	Velocidad angular entrada del eje de caja de engranes (rad/seg)
<i>ω_s</i>	Velocidad angular salida del eje de caja de engranes (rad/seg)

Acrónimos

<i>CA</i>	Corriente Alterna
<i>CA/CD</i>	Corriente Alterna - Corriente Directa
<i>CD</i>	Corriente Directa
<i>CD/CD</i>	Corriente Directa - Corriente Directa
<i>CFD</i>	Dinámica de Fluidos Computacional, por sus siglas en inglés
<i>Cp</i>	Coefficiente de Potencia
<i>Cpx</i>	Coefficiente de Potencia Extendido
<i>Cp_opt</i>	Coefficiente de Potencia Óptimo
<i>Duty</i>	Ciclo de trabajo, por sus siglas en inglés
<i>HAWT</i>	Turbina Hidráulica de Eje Horizontal, por sus siglas en inglés
<i>K1</i>	Constante para ajuste hidrodinámico 1
<i>K2</i>	Constante para ajuste hidrodinámico 2
<i>K3</i>	Constante para par de arranque de turbina
<i>K5</i>	Constante para desarrollo de cuasi MPPT 1
<i>K6</i>	Constante para desarrollo de cuasi MPPT 2
<i>MCD</i>	Modo de Conducción Discontinua
<i>MCC</i>	Modo de Conducción Continua
<i>MHR</i>	Río Micro Hidrocinético, por sus siglas en inglés
<i>MPP</i>	Punto de Máxima Potencia, por sus siglas en inglés
<i>MPPT</i>	Seguimiento del Punto de Máxima Potencia, por sus siglas en inglés
<i>n</i>	Relación de vueltas entre entrada y salida de caja de engranes
<i>NACA</i>	Comité Consultivo Nacional de Aeronáutica, por sus siglas en inglés
<i>PEM</i>	Membranas de Intercambio de Protones, por sus siglas en inglés
<i>PHES</i>	Bombeo Hidroeléctrico de Almacenamiento, por sus siglas en inglés
<i>PMG</i>	Generador de Imanes Permanentes, por sus siglas en inglés
<i>PP</i>	Pares de polos
<i>SAE</i>	Sistemas de Almacenamiento de Energía
<i>SPICE</i>	Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos Integrados, por sus siglas en inglés
<i>VAWT</i>	Turbina Hidráulica de Eje Vertical, por sus siglas en inglés

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción

En el mundo actual, la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes de energías limpias, va en aumento, dejando de lado las fuentes de obtención de energía tradicionales. Así mismo, los acuerdos nacionales e internacionales donde se ve involucrado México, con la meta de reducir los efectos contaminantes en el procedimiento de obtención de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles que afectan al planeta es una meta precisa que se comparte no solo de forma nacional, sino internacional [1].

Otra problemática conocida y en la cual aún se están buscando estrategias para poder efectuar acciones, es que todavía existen en México (y en otros países) viviendas aisladas de la red (casas rurales) que no tienen acceso a este importante servicio [2]. Esto entonces es una situación en la que aún existe gran parte de la población que no puede llevar una de vida digna dado que la red eléctrica no llega a ellas. Este conjunto de situaciones ha dado pie a múltiples esfuerzos de diferentes áreas como la ingeniería, ciencia y tecnología, en torno a trabajos de investigación y desarrollo tecnológico en México y el mundo, donde se ha encontrado viable el uso de algunas energías limpias, como lo son la energía solar, la eólica e hidráulica principalmente, sin embargo, cada una tiene sus ventajas y desventajas de acuerdo a diferentes situaciones [3].

El presente trabajo se enfoca en el aprovechamiento de la energía hidráulica proveniente de ríos o canales de agua (que incluso muchas veces las viviendas aisladas de la red tienen cerca de ellas); si bien, existen plantas hidroeléctricas, o proyectos de gran escala con turbinas tradicionales, este tipo de sistemas robustos se caracterizan por ser costosos, con alto tiempo de instalación (meses o años), y son más agresivos con el ecosistema del espacio donde se instalan, a diferencia de las turbinas hidrocinéticas, las cuales se han encontrado viables para la obtención de energía sin la necesidad de presas o conductos forzados como las turbinas tradicionales, por lo que este tipo de sistemas utilizando microturbinas hidrocinéticas

como elemento de generación, resulta viable y accesible en términos económicos y de tiempo, entre otros factores [4]. De igual forma estas turbinas aprovechan de distinta forma el recurso hídrico en función del espacio de instalación (condiciones de bloqueo) como en canales de agua, a diferencia de campo abierto (ríos), lo que pese a poder ser condiciones similares, se puede llegar a extraer mayor energía. Por lo que es preciso hacer un estudio detallado de la estimación del recurso hídrico [5].

Este sistema que se aborda en la tesis se muestra en la Figura 1.1.

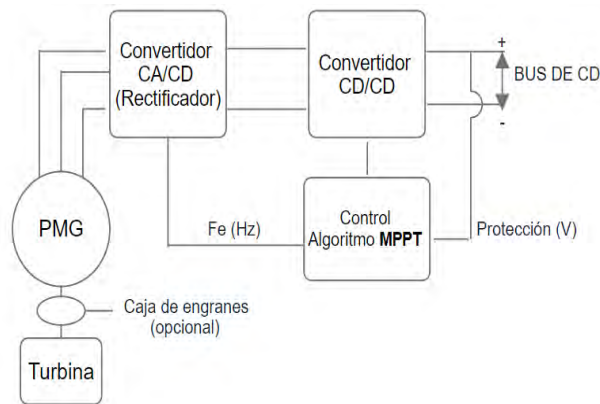


Figura 1.1 Diagrama del sistema de cosecha de energía que aborda la tesis.

Este tipo de sistemas de cosecha de energía utilizando microturbinas hidrocínéticas, tienen un conjunto de elementos de múltiples tipos, como mecánicos, electromecánicos, así como de electrónica de potencia, por lo que sería ideal contar con una guía de diseño con criterios y recomendaciones para este tipo de sistemas ya que en la literatura disponible no existe esa información de una manera específica.

En el presente documento se muestra una propuesta de una metodología para el diseño de este tipo de sistemas, considerando múltiples casos de estudio que podrían presentarse en escenarios reales, lo cual resulta un proyecto de alto interés ya que, de acuerdo a la revisión del estado del arte y uso de la tecnología, actualmente no existen metodologías de diseño de este tipo de sistemas de obtención de energía eléctrica a partir de turbinas hidrocínéticas colocadas en el lecho de un río o canales de riego.

1.1- Antecedentes

En las últimas décadas, se han buscado nuevas estrategias para la generación de energía eléctrica a partir de energías limpias, así como el poder contribuir en el acceso a la energía eléctrica en espacios rurales aislados de la red.

Gracias al desarrollo de diferentes proyectos de investigación disponibles en la literatura, se ha encontrado un alto potencial para el uso de microturbinas hidrocínéticas, donde mencionan que el desarrollo de un sistema microhidrocínético de río MHR (*Micro-Hydrokinetic River*, por sus siglas en inglés) autónomo es una de las tecnologías prometedoras para cumplir las necesidades de electricidad para espacios rurales a distancia [6].

A partir de esta realidad, algunos investigadores buscan la utilización de conjuntos de microturbinas para la generación de energía eléctrica a partir del potencial cinético que puede dar el movimiento del agua en diferentes espacios, que son viables en ubicaciones costeras y lechos de ríos; destacando su fiabilidad y ventaja económica de instalación [7].

También se han destacado sus amplias ventajas como bajos costos de instalación y capacidad de generación, así como un cambio de la filosofía tradicional a la modular, se han buscado estrategias para la caracterización de las microturbinas hidrocínéticas de eje vertical para el aprovechamiento de corrientes de bajas velocidades, utilizando una metodología basada en modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*), simulándose diferentes regímenes de funcionamiento y calculando los coeficientes de potencia (eficiencia) a diferentes velocidades de corriente [8].

Lo anterior ha generado amplios campos sumamente interesantes de investigación, para poder determinar mediante pruebas experimentales los rendimientos de las microturbinas hidrocínéticas de eje vertical u horizontal, las cuales se ha demostrado que son una alternativa viable para la obtención de energía eléctrica [9] y [10].

1.2- Planteamiento del problema

Ante la demanda energética en el país y a nivel mundial, así como de la población de escasos recursos que aún existe en varias comunidades que se encuentran aisladas de la red (y que se encuentren cercanas a un río de bajo cauce o canales de riego), se propone una metodología de diseño de este tipo de sistemas para poder electrificar dichas viviendas para el uso de elementos eléctricos de primera necesidad, instalando turbinas hidrocínéticas en ríos de bajo cauce o canales de riego. Así mismo ante los constantes proyectos y tratados nacionales e internacionales donde México está involucrado, se busca reducir para los próximos lustros la generación de energía a partir del uso de energías no limpias, lo que deriva a la búsqueda de estrategias para conseguir dichas metas mediante las energías renovables.

Cabe mencionar que es poca la literatura existente ante el uso de este tipo de alternativas a partir del uso de microturbinas hidrocínéticas, así como también es nula la información respecto a metodologías de diseño de este tipo de sistemas, por lo que esta tesis de maestría representa un trabajo original y con algunas aportaciones interesantes en beneficio de la sociedad y el país, en torno a la ingeniería, ciencia y tecnología. Otro aspecto ampliamente interesante, es el que la presente metodología de diseño, se validará con el software LTspice (software libre y de baja demanda de recursos del ordenador a diferencia de otros existentes), demostrando la viabilidad de la implementación propuesta.

1.3- Objetivos

1.3.1- General

Crear una metodología de diseño y caracterización de un proyecto de cosecha de energía a partir de microturbinas hidrocínéticas colocadas en el lecho de un río de bajo cauce o canales de riego, para electrificación de una casa rural aislada de la red eléctrica, validando el diseño de diferentes casos de estudio mediante el software LTspice.

1.3.2- Específicos

1. Dominar la teoría de funcionamiento de microturbinas hidrocinéticas para su caracterización y diseño.
2. Asimilar el modelado y diseño de microturbinas respecto a condiciones específicas para un rango de caudal y potencia.
3. Contar con una metodología que permita la selección de elementos en los sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir de microturbinas hidrocinéticas.
4. Validación por simulación en la plataforma LTspice® del sistema completo de cosecha de energía con el uso de microturbinas hidrocinéticas.

1.4- Justificación

Ante la proliferación de este tipo de aplicaciones para generar la energía en comunidades rurales, así como al realizar una revisión del estado del arte, no se encontró en la literatura procedimientos o metodologías para abordar este tipo de sistemas utilizando turbinas hidrocinéticas de eje vertical, por lo que resulta importante contar un procedimiento o metodología clara para abordar la implementación de este tipo de sistemas y posteriormente validarlo mediante algún software, como en este caso se usa LTspice.

1.5- Alcances y limitaciones

1.5.1.- Alcances

El desarrollo del presente proyecto, permite al usuario contar con una guía de diseño para este tipo de sistemas detallada desde la parte de la obtención de la energía, hasta el bus de CD, lo que permitiría acceder a la energía eléctrica a casas de comunidades aisladas de la red para el uso de elementos

eléctricos de primera necesidad que les permita llevar una mejor calidad de vida.

1.5.2.- Limitaciones

El desarrollo de esta metodología solo aplicaría para microturbinas hidrocinéticas de eje vertical, sin embargo, habría que validarlo también mediante las pruebas físicas y experimentales para considerar algunas pérdidas respecto a la eficiencia de este tipo de turbinas. Así mismo quedaría pendiente el desarrollo de proyectos similares respecto a otras situaciones como la interconectividad a la red o el dimensionamiento de una microrred para resolver los requerimientos específicos de una determinada aplicación.

1.6- Organización del documento de tesis

La presente tesis, aborda en total 5 capítulos, los cuales están organizados como se muestra a continuación.

Capítulo 2. Presenta un marco teórico de acuerdo a los temas principales que aborda la tesis, con el fin de poder comprender mejor cada uno de los elementos y capítulos que aborda el documento. Así mismo, se describe la revisión del estado del arte y del uso de la tecnología presentes en la literatura para resolver la problemática en cuestión, mencionando los distintos temas en relación uso de microturbinas hidrocinéticas, y haciendo énfasis principalmente en el tema de metodologías de diseño de sistemas de cosecha de energía que utilizan microturbinas hidrocinéticas.

Capítulo 3. Muestra el desarrollo de la metodología de diseño, con cada uno de los elementos del sistema, mencionando los criterios y consideraciones a tener en cuenta en el desarrollo de este tipo de sistemas, enfocándonos en cuatro casos de estudio particulares propuestos, y considerando la instalación de la turbina en ríos de bajo cauce o canales de riego.

Capítulo 4. Plantea la validación de la metodología de diseño abordando cuatro casos de estudio particulares tanto en un río de bajo cauce como de un canal de riego (espacio semicerrado), todo esto validado mediante el software LTspice. Primeramente, se mencionan las recomendaciones para ejecutar la validación, los resultados de la validación y las conclusiones después de mostrar dichos resultados con el fin de poder tener el contexto general de este capítulo.

Capítulo 5. En este apartado se abordan las conclusiones generales de la tesis, así mismo se habla de las áreas de oportunidad para trabajos futuros, así como de algunos de los productos académicos, que fueron el resultado derivado del trabajo constante para el desarrollo del mismo tema de tesis.

**CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO
Y REVISIÓN DEL
ESTADO DEL
ARTE**

Capítulo 2. Marco Teórico y Revisión del Estado del Arte

La metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocínicas, es un tema amplio y multidisciplinar, por la naturaleza de cada uno de los elementos que tiene el sistema en sí, desde la etapa de captación de energía hasta la conversión de la misma, todo esto está conformado con elementos mecánicos, electromecánicos y electrónicos, por lo que es importante conocer un amplio conjunto de conceptos como se muestra a continuación en el desarrollo del marco teórico.

Posteriormente en este mismo capítulo en el apartado 2.9 se aborda la revisión del estado del arte, mostrando los criterios que se consideraron, así como la metodología y conclusiones del mismo, con el fin de poder destacar las áreas de oportunidad, así como de algunas muy interesantes aportaciones del presente trabajo, y poder sustentar cada uno de los elementos mencionadas en el capítulo en torno a la problemática a resolver, para después poder abordar en el capítulo 3 la metodología de diseño propuesta.

2.1.- Sistemas de cosecha de energía

El concepto de “cosecha de energía” (Energy Harvesting) generalmente está relacionado con el uso, almacenamiento y gestión de la energía del ambiente, y que es convertido principalmente en energía eléctrica para su uso en aplicaciones que requieren pequeña potencia. Pese a que el término existe desde hace varias décadas por el uso de sistemas tradicionales como plantas hidroeléctricas, se empezó a hacer más popular en las últimas décadas con el uso de sistemas de micro generación como los sistemas solares o eólicos [11].

Un sistema de cosecha de energía, también conocido como sistema de recolección de energía o sistema de generación de energía autónoma, se refiere a un conjunto de dispositivos diseñados para capturar y almacenar pequeñas cantidades de

energía de fuentes ambientales y convertirla en electricidad utilizable. Estos sistemas son especialmente útiles en situaciones donde la conexión a una fuente de energía externa puede ser difícil o poco práctica. Así mismo, este tipo de sistemas pueden tener algunas variantes de arquitectura y diseño entre ellos de acuerdo a criterios económicos, ambientales (entorno de instalación) o de acuerdo al tipo de fuente de generación de energía (energía solar, eólica, térmica o hidráulica, por ejemplo). En la Figura 2.1, se muestra un ejemplo de un sistema de cosecha de energía (en este caso solar).

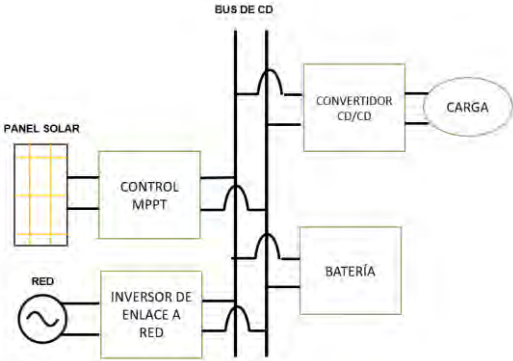


Figura 2.1 Ejemplo de un sistema de cosecha de energía.

Es importante conocer las características principales que tienen este tipo de sistemas. En la Figura 2.2, se muestra una serie de elementos clave en los sistemas de cosecha de energía.

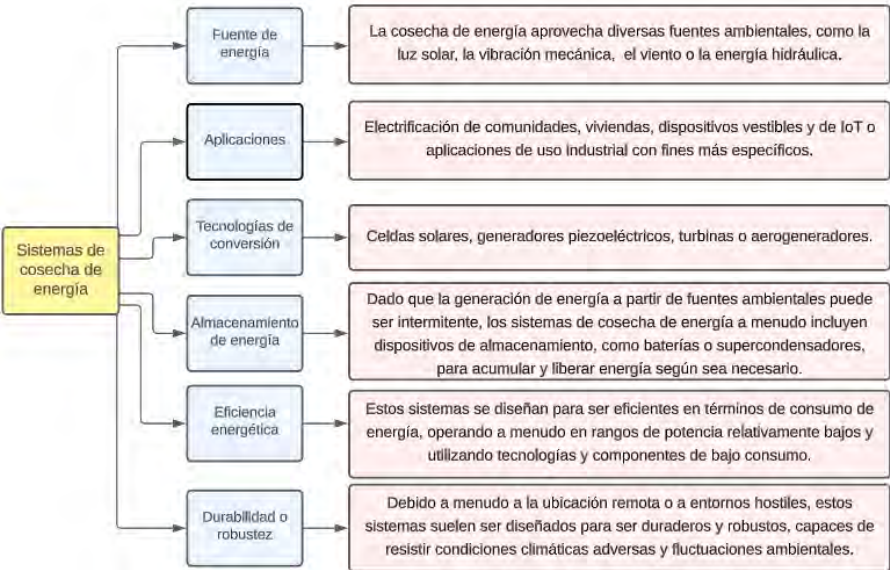


Figura 2.2 Elementos clave en los sistemas de cosecha de energía.

Los sistemas de cosecha de energía son especialmente relevantes en aplicaciones donde el cambio frecuente de baterías no es práctico o es difícil de realizar. Al aprovechar las fuentes ambientales (energías renovables), estos sistemas pueden proporcionar una fuente continua de energía para dispositivos electrónicos de baja potencia, contribuyendo así a soluciones más sostenibles y autónomas.

2.2.- Sistemas de cosecha de energía hidráulica

Son aquellos sistemas de generación de energía a partir del uso del movimiento de la energía disponible en el caudal de agua, pudiendo aprovechar la energía cinética, la potencial, de altura o de la de presión dependiendo de las aplicaciones, y mediante el uso de un generador se transforma en energía eléctrica.

Así mismo el aprovechamiento del recurso hídrico va desde pequeños caudales, mareas o corrientes del agua, ya sea en ríos, canales de riego, embalses o mares, así mismo la energía hidráulica es una forma de energía sustentable que aprovecha la fuerza generada por el descenso del agua (o caudal del agua) y una de sus principales ventajas es que no presenta intermitencia como otras fuentes renovables (como la irradiancia solar o la velocidad del viento, por ejemplo).

Las instalaciones se encuentran en las presas y utilizan el agua almacenada en pantanos o embalses como fuente de energía. Al descender, el agua fluye a través de turbinas hidráulicas que, al transmitir energía a un generador, la transforman en energía eléctrica [12] y [13].

La presente investigación, se enfoca en el aprovechamiento del recurso hídrico disponible ya sea en ríos de bajo caudal (aprovechando la energía cinética del fluido, siendo análogo a la teoría de energía eólica), así como en canales de riego (aprovechando la energía cinética y de altura de ella).

En la Figura 2.3, se muestra un ejemplo de sistema de cosecha de energía hidráulica con una turbina hidrocínética.

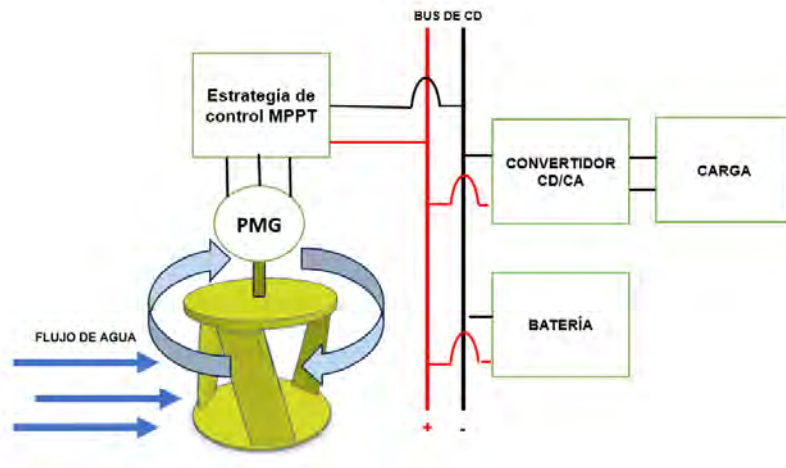


Figura 2.3 Ejemplo de sistema de cosecha de energía hidráulica.

2.3.- Turbinas hidrocinéticas

Son dispositivos que se utilizan para obtener energía de corrientes fluyentes de agua en ríos, canales de agua o estuarios. El aprovechamiento se realiza por medio de rotores cuyo diseño aprovecha el término cinético de la corriente (velocidad). El Departamento de Energía de los Estados Unidos, define a estos rotores como “turbinas de baja presión que aprovecha la corriente fluyente de un cauce con baja energía potencial”, siendo la diferencia de cotas aguas arriba y abajo inferior a 0.2 metros [7].

Las turbinas pueden ser categorizadas dependiendo de la orientación del eje de rotación con respecto a la dirección del flujo del agua. Se distingue entre turbinas axiales, en las cuales su eje es paralelo a la corriente de agua, y turbinas de flujo cruzado, cuyo eje es perpendicular a la corriente [14] y [15].

2.3.1.- Tipologías de turbinas hidrocinéticas

Actualmente, el aprovechamiento de las corrientes de flujo de agua se efectúa, principalmente, utilizando dos tipologías de turbinas hidrocinéticas: turbinas de eje horizontal (Horizontal Axis Water Turbines, *HAWT*) y turbinas de eje vertical (Vertical

Axis Water Turbines, *VAWT*). Por un lado, en la tipología *HAWT*, los diseños son análogos a los molinos eólicos, buscándose maximizar el área barrida por sus palas para aumentar la capacidad de extracción de energía [16] y [17]. La Figura 2.4 muestra una imagen de una turbina *HAWT*.



Figura 2.4 Ejemplo de turbina HAWT [18].

Por otro lado, en la tipología *VAWT* se buscan hacer más eficientes las actividades de mantenimiento e instalación ya que, los componentes eléctricos y electrónicos se colocan fuera del agua.

Cabe mencionar que el presente documento se enfoca principalmente en las turbinas de este tipo, las cuales hasta ahora existen múltiples diseños en función de la estructura y diseño de sus álabes, como pueden ser las turbinas tipo Gorlov, Darrieus, entre otras. En la Figura 2.5, se muestra un ejemplo de una turbina tipo *VAWT*.

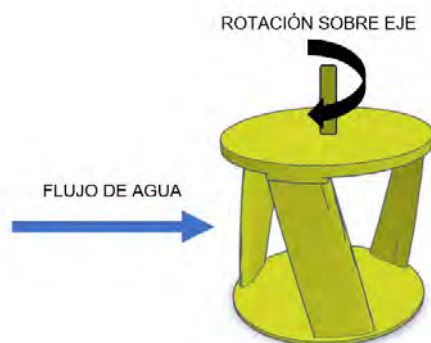


Figura 2.5 Ejemplo de turbina VAWT.

A su vez, las turbinas hidrocinéticas se dividen en dos grandes tipologías, de acuerdo con su comportamiento hidrodinámico; turbinas de sustentación (lift) o de arrastre (drag).

A.- Turbinas de arrastre

En las turbinas de arrastre, la fuerza preponderante es la de empuje y tienen como principal ventaja su facilidad de arranque a bajas velocidades. Sin embargo, la velocidad en la punta del álabe raramente superará a la del fluido, por lo que tanto el rendimiento como la energía generada será muy reducida. Las turbinas de arrastre son un tipo de tecnología de energía eólica o hidráulica que difiere de las turbinas eólicas convencionales en su diseño y enfoque de captura de energía. Mientras que las turbinas convencionales capturan la energía cinética del viento (o agua) mediante las palas en movimiento, las turbinas de arrastre se centran en aprovechar la fuerza del fluido que actúa sobre una estructura que crea resistencia (arrastre) [19]. Estas tienen algunas características específicas, como:

- **Diseño simplificado:** Las turbinas de arrastre a menudo tienen un diseño más simple en comparación con las turbinas convencionales.
- **Menos partes móviles:** Pueden tener menos partes móviles, lo que puede reducir costos de mantenimiento.
- **Captura de energía del agua de arrastre:** En lugar de capturar la energía cinética rotacional, capturan la energía del fluido que actúa sobre la estructura de arrastre.

Algunos diseños de turbinas de arrastre están orientados a aplicaciones de pequeña escala, como generación de energía para comunidades rurales.

B.- Turbinas de sustentación

Con el objetivo de aumentar su rendimiento, en los últimos tiempos se han realizado importantes avances en el desarrollo de diseños de turbinas por sustentación. En esta tipología de rotores, la fuerza preponderante es la sustentación, por lo que la

velocidad en la punta del álabe es considerablemente mayor que la velocidad de la corriente. Estas turbinas alcanzan rendimientos superiores a las de arrastre, pero tienen problemas de arranque a velocidades bajas. En este sentido, cabe mencionar que para lograr la velocidad de arranque se han desarrollado sistemas híbridos compuestos por turbina de arrastre y de sustentación o sistemas electrónicos que permiten el arranque del generador como motor (B2B-back-to-back).

Otro aspecto clave en las turbinas por sustentación es el diseño del álabe, ya que aspectos como su geometría, solidez o el ángulo de álabes, son claves en el rendimiento final del rotor. Existen numerosas geometrías que han sido estudiadas tanto de forma experimental como numérica de modo que se conoce su comportamiento ante la incidencia de un flujo, como las series *NACA* (National Advisory Committee for Aeronautics, *NACA*) [20].

2.4.- Generador de Imanes Permanentes (PMG)

Los generadores magnéticos permanentes son máquinas síncronas con los bobinados del rotor sustituidos por imanes permanentes. En el contexto de generadores eléctricos y sistemas de energía, las siglas "PMG" pueden referirse a "Permanent Magnet Generator" (Generador de Imán Permanente, en español). Un PMG utiliza imanes permanentes para generar un campo magnético y, por lo tanto, producir electricidad.

Este tipo de generador es comúnmente utilizado en aplicaciones donde la eficiencia y la durabilidad son importantes, como en sistemas de energía renovable y generadores sin escobillas. No necesitan una excitación separada, de modo que las pérdidas en la excitación, en torno al 30 % del total de pérdidas del generador, se eliminan. Esto ofrece una alta densidad de potencia junto con un tamaño más compacto y mayor eficiencia en todas las velocidades, ofreciendo la mayor productividad durante todo el ciclo de vida [21].

En los sistemas eólicos (por ejemplo), son altamente utilizados por las ventajas que demuestran, principalmente cuando es a baja velocidades del fluido que atraviesa

los aerogeneradores, o por la misma naturaleza de diseño y construcción de estos, por lo que se recomiendan ampliamente, incluso para evitar el uso de la reductora mecánica (caja de engranes), que resulta viable en términos económicos [22].

2.5.- Convertidores CD/CD

Un convertidor CD/CD es un dispositivo destinado a regular la magnitud del voltaje o corriente, transformando una tensión de entrada no regulada en una salida de tensión directa regulada, esto con un arreglo entre elementos de conmutación (como BJT's o Mosfets) junto con capacitores e inductores.

Su función principal es tomar una entrada de corriente continua a un cierto nivel de voltaje y producir una salida de corriente continua a un nivel de voltaje diferente. Existen muchas topologías de convertidores conocidas, como son Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Zeta y Flyback entre otros [23].

Algunos muestran equivalencias entre sí, sin embargo, cada uno de estos circuitos presentan características propias, por lo que se deben considerar mediante un previo análisis diferentes factores que permitan seleccionar la topología más adecuada a utilizar. En la Figura 2.6. se muestra un ejemplo de convertidor CD/CD, en este caso de topología elevadora, la cual es una de las más utilizadas ya que al tener un inductor en la entrada presenta una corriente no pulsante que es una mejor opción para sistemas de cosecha de energía (panel fotovoltaico)

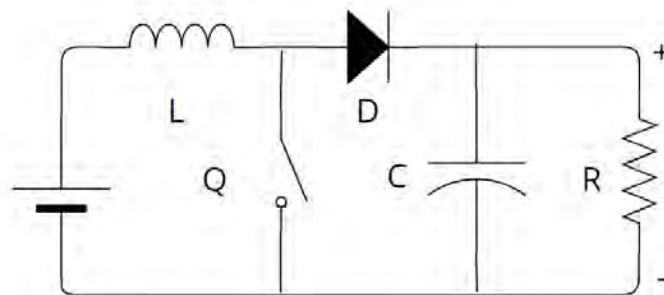


Figura 2.6 Ejemplo de convertidor CD/CD de topología elevadora (Boost Converter).

Estos convertidores son esenciales en una variedad de aplicaciones donde se requiere la conversión eficiente de energía, como en sistemas de energía renovable, electrónica de consumo, automoción, sistemas de alimentación eléctrica, entre otros. Así mismo, en los convertidores CD/CD, existe una clasificación de acuerdo a modo de funcionamiento del inductor, como es el modo de conducción continuo y discontinuo.

En el modo de conducción continua MCC, (que se refiere a la operación del inductor), donde la corriente a través del inductor nunca disminuye a cero durante el ciclo de conmutación. A diferencia del modo de conducción discontinua (MCD), donde la corriente a través del inductor se reduce a cero durante parte del ciclo, en el modo de conducción continua, la corriente fluye de manera constante, minimizando las variaciones y optimizando la eficiencia del sistema. En el MCC, la corriente a través del inductor es constante durante todo el ciclo de conmutación.

Este modo suele ser preferible en aplicaciones sensibles a la corriente continua, ya que reduce las fluctuaciones de corriente y, por lo tanto, las pérdidas de energía. Sin embargo, el diseño y la eficiencia de estos convertidores pueden variar según la aplicación específica y los requisitos de carga.

Adicional al modo de conducción operativa de este tipo de convertidores, podemos también clasificarlos en convertidores con y sin aislamiento, que es uno de los criterios importantes a considerar al seleccionar uno de ellos de acuerdo a la aplicación que uno desea, en este caso, de acuerdo a un sistema de cosecha de energía.

2.5.1.- Convertidores sin aislamiento

Los convertidores CD/CD sin aislamiento son aquellos en los que no hay una barrera (como un transformador) entre la entrada y la salida, y, por lo tanto, no proporcionan aislamiento eléctrico entre ambas. En otras palabras, la conexión eléctrica es directa entre la entrada y la salida del convertidor.

Estos convertidores son generalmente más simples y más económicos de diseñar y fabricar en comparación con los convertidores con aislamiento. Al no tener la necesidad de incorporar un transformador, suelen ser más compactos y ligeros, lo que puede ser una consideración importante en aplicaciones donde el espacio y el peso son críticos. Sin embargo, la falta de aislamiento eléctrico puede ser una limitación en ciertos contextos.

En aplicaciones donde es crucial evitar la transferencia de energía o la interferencia entre la entrada y la salida, se prefieren los convertidores con aislamiento.

En la Figura 2.7, se muestra un ejemplo de un convertidor CD/CD sin aislamiento, de tipo Buck-Boost.

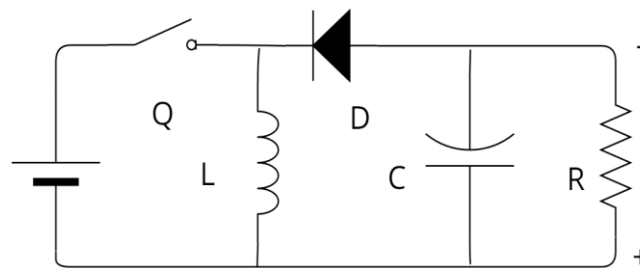


Figura 2.7 Ejemplo de convertidor CD/CD sin aislamiento (Buck-Boost Converter).

2.5.2.- Convertidores con aislamiento

Estos convertidores CD/CD con aislamiento son esenciales en aplicaciones donde se requiere protección eléctrica entre la entrada y la salida, como en sistemas de potencia, comunicaciones, sistemas médicos y otras aplicaciones industriales.

La elección del convertidor dependerá de factores como la potencia requerida, la eficiencia, el tamaño y la complejidad del diseño, así mismo, esto influye en los sistemas de cosecha de energía, como el presente tema de tesis, donde se abordarán criterios a considerar para poder seleccionarlos.

Estos elementos son esenciales también en los sistemas de cosecha de energía, por ejemplo, de sistemas fotovoltaicos, eólicos o hidráulicos, principalmente donde se requiere de protecciones por cuestiones de seguridad.

En la Figura 2.8, se muestra un ejemplo de un convertidor CD/CD con aislamiento, de tipo Flyback.

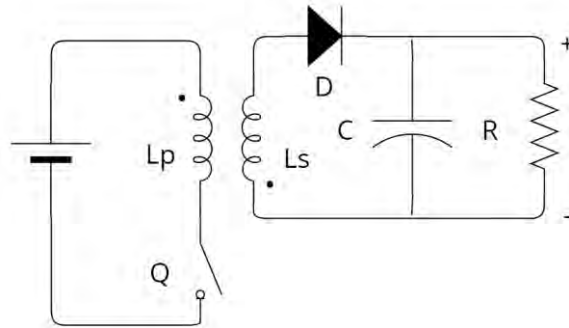


Figura 2.8 Ejemplo de convertidor CD/CD con aislamiento de tipo Flyback.

En resumen, la principal diferencia entre convertidores CD/CD con y sin aislamiento radica en la presencia o ausencia de una barrera, como un transformador, que proporciona aislamiento eléctrico entre las etapas de entrada y salida del convertidor. La elección entre uno u otro dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y las consideraciones de diseño, costos y espacio.

2.6.- Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE)

Un sistema electrónico para almacenamiento de energía es un conjunto de dispositivos electrónicos diseñados para gestionar y almacenar energía eléctrica de diversas fuentes. Estos sistemas desempeñan un papel crucial en la optimización del uso de la energía, permitiendo su almacenamiento cuando está disponible en exceso y su liberación cuando se requiere [24].

Permiten equilibrar la oferta y la demanda de energía, gestionar la intermitencia de fuentes renovables y proporcionar respaldo en momentos críticos. Existen múltiples tipos de sistemas de almacenamiento de energía, sin embargo, en el campo de las energías renovables, los más utilizados son las baterías, supercondensadores, volantes de inercia, hidrogeno y bombeo de agua.

No obstante, en la Figura 2.9, se muestra un esquema de clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía, con el fin de poder



Figura 2.9 Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) principales.

2.6.1.- Baterías

Las baterías son componentes esenciales en los sistemas de almacenamiento de energía, y su versatilidad las convierte en una opción común para almacenar la electricidad generada por fuentes renovables y suministrarla cuando sea necesario. Estas son las más utilizadas en los sistemas de cosecha de energía, y no solo en ellas, sino en múltiples áreas [25].

Estas se pueden clasificar en función de la tecnología de las mismas, las más habituales se muestran en la Figura 2.10, junto con sus características principales y aplicaciones.

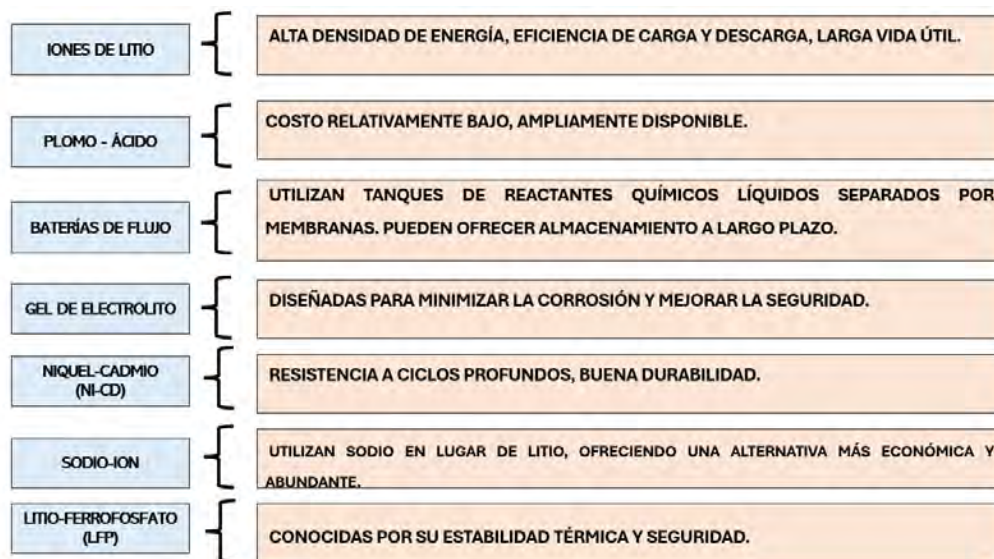


Figura 2.10 Clasificación de baterías de acuerdo a su tecnología.

2.6.2.- Supercondensadores

Los supercondensadores, también conocidos como capacitores de doble capa o ultra capacitores, son dispositivos de almacenamiento de energía que se utilizan para proporcionar rápidas ráfagas de energía y almacenar cantidades relativamente pequeñas de energía de manera altamente eficiente. Los supercondensadores, también conocidos como ultra capacitores, son dispositivos de almacenamiento de energía que operan en principios físicos distintos a las baterías tradicionales. Su funcionamiento se basa en la formación de una "doble capa eléctrica" en la interfaz entre electrodos de carbono y un electrolito.

La característica definitoria de los supercondensadores es su capacidad para entregar y recibir cargas eléctricas de manera extremadamente rápida. Esto los hace ideales para aplicaciones que requieren ráfagas de energía instantáneas. Además, los supercondensadores exhiben una larga vida útil y requieren poco mantenimiento gracias a la ausencia de reacciones químicas durante su operación.

En la anatomía de los supercondensadores (ver Figura 2.11), los electrodos de carbono juegan un papel crucial. Estos materiales porosos, a menudo en forma de carbón activado, proporcionan una gran área superficial para la formación de la doble capa eléctrica. Los electrolitos, que pueden ser acuosos o basados en solventes orgánicos, completan la ecuación esencial para el almacenamiento eficiente de energía [26].

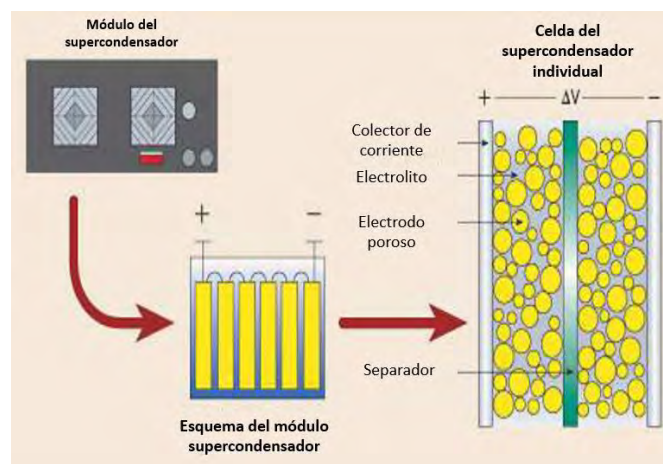


Figura 2.11 Esquema de un supercondensador [26]

2.6.3.- Volantes de inercia

Los volantes de inercia, también conocidos como volantes cinéticos o volantes de almacenamiento de energía, son dispositivos mecánicos utilizados para almacenar energía cinética rotacional. Funcionan girando a altas velocidades y acumulando energía cinética, que luego se puede liberar cuando se necesita. A diferencia de las baterías convencionales, los volantes de inercia no implican reacciones químicas y pueden ofrecer respuestas rápidas a cambios en la demanda de energía [27].

En la Figura 2.12 se proporciona información más detallada sobre estos dispositivos.

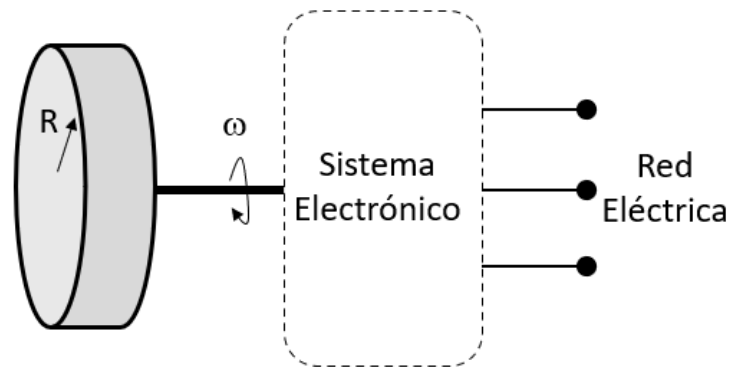


Figura 2.12 Esquema de un volante de inercia.

2.6.4.- Celdas de combustible

Las celdas de combustible son el almacenamiento de energía mediante la generación de hidrógeno, y representa una estrategia fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible. Se almacena la energía produciendo hidrógeno y hay tres opciones de almacenamiento sólido (hidruros metálicos), líquido (baja temperatura) y gaseosos (alta presión). Para luego recuperar la energía almacenada hay dos opciones, la primera es quemar el hidrogeno como combustible o bien convertir el hidrogeno en electricidad otra vez (membranas de intercambio protónico o pilas *PEM*).

Este proceso se inicia con la electrólisis del agua, donde la electricidad, preferiblemente de fuentes renovables, se utiliza para dividir el agua en oxígeno e hidrógeno. Durante períodos de alta generación de energía renovable y baja demanda, se emplea el excedente de electricidad para realizar la electrólisis, generando hidrógeno que se almacena para su uso posterior [28].

Existen diversas formas de almacenar hidrógeno, desde su compresión en tanques de alta presión hasta su conversión en líquido criogénico a temperaturas extremadamente bajas. También se investiga el almacenamiento en hidruros metálicos, que permiten absorber y liberar hidrógeno de manera eficiente. Este hidrógeno almacenado encuentra aplicaciones en varios sectores, como el transporte, donde se utiliza como combustible en vehículos de pila de combustible, la generación de energía estacionaria, mediante la conversión de hidrógeno en electricidad para respaldar la red eléctrica, y en la industria, integrándose en procesos industriales y químicos.

2.6.5.- Bombeo de agua

El bombeo de agua para almacenamiento de energía emerge como una estrategia eficaz para gestionar la fluctuación en la oferta y demanda de electricidad. Este método, conocido como bombeo hidroeléctrico de almacenamiento (*PHES*), opera mediante la elevación de agua a alturas superiores durante períodos de excedente energético y su liberación para generar electricidad en momentos de alta demanda.

El proceso comienza cuando hay un exceso de electricidad en la red, típicamente proveniente de fuentes renovables como la solar o eólica. En este momento, las bombas impulsan el agua desde un depósito inferior a uno superior, almacenando así la energía potencial.

Cuando la demanda aumenta y se requiere energía adicional en la red, el agua se libera desde el depósito superior, generando electricidad a medida que fluye hacia abajo a través de turbinas conectadas a generadores[29].

2.7.- Algoritmo del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Ante la variabilidad de la potencia generada por diferentes fuentes renovables dependientes de la irradiación solar o el viento, por ejemplo, es necesario contar con un sistema que permita extraer la máxima potencia disponible durante diferentes situaciones del recurso en el día.

El *MPPT* es un sistema que permite obtener la máxima potencia de sistemas de generación de energía eólica, solar o hidráulica, por lo general este tipo de módulos tiene incorporado un algoritmo (o estrategia de control) el cual permite que el sistema opere en un punto específico de las curvas características de la radiación del sol o de la velocidad del viento, según sea el caso al que se aplique.

MPPT son las siglas de “Maximum Power Point Tracker”, lo que significa en español seguidor del punto de máxima potencia [30]. Es importante destacar que, los sistemas de extracción de energía eléctrica a partir de energía hidráulica, tienen ventaja de no mostrar cambios bruscos en la energía disponible, sin embargo, el uso del *MPPT*, permite aumentar la eficiencia en el proceso de generación y almacenamiento de energía del mismo.

2.8.- Software de validación del comportamiento del diseño

Un simulador electrónico, es una herramienta informática que permite reproducir sobre el computador el funcionamiento de los circuitos eléctricos y electrónicos, de forma que pueda compararse tal funcionamiento con el deseado hasta comprobar que el diseño funciona correctamente, que cumple las especificaciones que se desean alcanzar, así mismo se detecte cualquier defecto o anomalía en el funcionamiento del circuito, para corregirlo o, en su caso, verificar que es admisible y se conozca cualquier transitorio o cualquier particularidad funcional del circuito para evaluar sus efectos y valorar la necesidad o no de evitarlo.

Los simuladores eléctricos o electrónicos reproducen el comportamiento físico real de los circuitos, es decir, su comportamiento eléctrico, a través de los valores de las

tensiones e intensidades en los diversos nodos y ramas del circuito a la largo del tiempo; lo cual permite conocer la respuesta real del circuito frente a las señales de entrada que interesan y, en concreto, los transitorios reales, los tiempos de propagación efectivos, los posibles espurios (*glitches*) u oscilaciones, la violación, en su caso, de los tiempos de anticipación o de mantenimiento de las entradas en las partes secuenciales [31].

2.9.- Revisión del estado del arte

La presente tesis, al abordar una metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocínéticas, resulta ser (como ya se mencionó) un tema multidisciplinar, ya que el sistema es un conjunto de elementos de varios tipos, como mecánicos, electromecánicos y electrónicos, por lo que después de abordar el marco teórico, se aborda entonces la revisión y conclusiones del estado del arte en este apartado.

Para esta sección de revisión del estado del arte se utilizaron algunas herramientas como: IEEEExplore, ResearchRabbit, Conected Papers, ReadCube y Google Académico.

Se inicia con información en la literatura de este tipo de turbinas hidrocínéticas de eje vertical como elementos de generación de energía, para posteriormente hablar de los sistemas de cosecha de energía hidráulica donde estas turbinas son utilizadas como elemento principal de generación de energía.

Posteriormente de aborda la revisión del estado del arte en metodologías de diseño de este tipo de sistemas, así como una revisión del software LTspice para creación de modelos (como el presente trabajo), que también es importante valorarlo o que tipos de softwares se utilizan. Todo esto con el fin de poder destacar la aportación (o aportaciones) del trabajo.

2.10.- Turbinas hidrocínéticas de eje vertical

Inicialmente, se tiene que destacar que el uso de este tipo de turbinas como elemento de generación y captación de energía, es relativamente nuevo, ya que

tiene poco de empezar a implementarse como estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico en mares, canales de agua, ríos entre otros; ya que la literatura existente tiene que ver más que nada con las últimas dos décadas, es decir, es reciente lo poco existente en este tipo de turbinas hidrocínéticas. Si bien, la teoría de turbina eólicas es análoga a la de turbinas en campo abierto (ríos o mares), existe poca información referente al uso de turbinas hidrocínéticas, y aún menos respecto al hecho de instalarlas en canales de agua (o canales de riego), donde el aprovechamiento del recurso hídrico es diferente ante las condiciones por bloqueo del fluido, lo que igual denota un campo interesante de aportación, ya que es un área de estudio e investigación bastante reciente.

Ahora referente a la literatura disponible, existe un amplio interés por la parte del modelado de estas turbinas con *CFD* (Dinámica de Fluidos Computacional), donde hay trabajos de diferentes autores en la manera de caracterizar y analizar este tipo de turbinas, comparando los coeficientes de potencia obtenidos, ante diversas pruebas experimentales ante diferentes caudales propuestos del fluido [32], [33].

Algunos de estos trabajos buscan desarrollar modelos experimentales antes de crear prototipos físicos, así como [34], o quienes utilizan el software Matlab de forma comparativa entre *CFD* y este software para analizar la eficiencia de turbinas, por ejemplo, tipo Darrieus [35], creando programas que permitan validar mediante el análisis dinámico el comportamiento de la turbina.

Existen múltiples trabajos que analizan también otras de las condiciones de este tipo de turbinas, como es el colocarlas en canales de riego, donde se estudia el comportamiento de turbinas hidrocínéticas en este espacio de instalación ante condiciones que diversos autores de la rama de ingeniería mecánica llaman condiciones por bloqueo [36], así mismo una variante de este tipo de turbinas es la Gorlov, que se ha visto ampliamente utilizada como núcleo de investigación en algunos trabajos que buscan analizar su rendimiento en ríos de bajo caudal [37] y se ha demostrado como una opción novedosa (a diferencia de turbinas darrieus o savonius) útil en este tipo de aplicaciones.

Así mismo tenemos que algunos autores [38], hacen pruebas referentes a los sistemas aislados, en este caso haciendo la comparativa entre la energía solar y la energía hidráulica como fuentes de energía para obtención de energía eléctrica. Con esto podemos entonces destacar que, al trabajar con microturbinas, se puede optimizar la relación costo beneficio de los sistemas hidrocinéticos y que es muy poca la información en la literatura respecto a estos elementos de generación de energía.

2.11.- Sistemas de cosecha de energía hidráulica

El uso de turbinas hidrocinéticas como elemento de generación de energía principal, deriva a trabajos interesantes en torno a la ingeniería, ciencia y tecnología, sin embargo, y pese a que resultan ser muy interesantes las áreas de oportunidad, son pocos los trabajos que existen acerca de los sistemas de cosecha de energía hidráulica utilizando este tipo de turbinas de eje vertical (derivado de ser temas de reciente investigación).

Si bien, existen trabajos como ya se mencionaron respecto a la etapa de ingeniería mecánica, en cuanto a diseño (variantes como turbinas Gorlov, Darrieus, Savonius), construcción, pruebas experimentales (respecto al uso *CFD*), o propiamente de materiales de fabricación.

Tenemos entonces pocos trabajos referentes a sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de turbinas más tradicionales donde se destaca la oportunidad de aprovechar las corrientes de agua [39], así mismo se destaca el trabajo de algunos autores que demuestran la viabilidad del uso de microturbinas hidrocinéticas para microrredes o para abastecer de energía eléctrica una vivienda rural aislada, como alternativa de generación de energía, destacando que estas turbinas se adaptan fácilmente a cualquier espacio de instalación como mares, ríos o canales de agua, así como de no ser agresivas con el espacio donde se instalen (a diferencia de las turbinas tradicionales, como la turbina Kaplan, Francis o Pelton, entre otras) [4], [5], [40].

Ante este conjunto de información, resultaría ampliamente interesante contar con una metodología de diseño de este tipo de sistemas de cosecha de energía, que permitan el desarrollo e implementación con base a ciertos criterios y en función del perfil de consumo de una vivienda rural aislada de la red.

2.12.- Metodologías de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica

Mencionado lo existente en la literatura de este tipo de turbinas, es ahora importante mencionar la parte nodal del presente tema de tesis, donde las turbinas hidrocinéticas se utilizan como elemento de generación principal, y actualmente en la literatura, no existen metodologías de diseño como la que se aborda en este documento, solo algunas similares donde se enfocan principalmente en la energía solar, eólica y biomasa [41].

Adicionalmente, se han encontrado metodologías de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica que permite aprovechar la energía para uso de viviendas rurales aisladas de la red, sin embargo, no profundizan en ningún tema y solo hablan de variabilidades de aprovechamiento del recurso hídrico [42] y [43].

Lo más cercano al presente trabajo, es el desarrollo de una metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas de tipo propela (eje horizontal), sin embargo, solo se enfocan más en la etapa de *CFD* y diseño mecánico dejando de lado la electrónica de potencia [44]. Por lo que podemos destacar que no existe en la literatura metodologías de diseño de este tipo de sistemas como el que se aborda la tesis, justificando la aportación de este trabajo.

2.13.- Softwares para modelado de turbinas

Existen diferentes softwares utilizados con el fin de crear o validar modelos de simulación de turbinas, los que existen en su mayoría son utilizados con modelos previamente creados y guardados en el software por parte de los desarrolladores,

como Psim o Matlab/Simulink, sin embargo, no se ha encontrado cantidad de trabajos significantes referentes al uso de LTspice, a excepción de un trabajo que aborda estrategias de control sin sensores y gestión de la energía para aerogeneradores [45].

Se puede decir entonces, que incorporar LTspice como una herramienta de validación del diseño es también una aportación interesante y original en esta investigación ya que se crean los modelos de cada uno de los elementos y posteriormente se simula todo el sistema con el fin de validar los casos de estudio (utilizando símiles eléctricos en el caso de los elementos mecánicos).

También es importante y puntual mencionar, que algunos de los softwares (como los mencionados y otros más) tienen modelos incorporados de turbinas, suelen considerar el coeficiente de potencia en campo abierto (teoría análoga de energía eólica), donde existe un límite teórico de aprovechamiento del recurso hídrico (límite de Betz), sin embargo estos modelos no servirían en el caso de pretender simular una turbina en canales de agua (ya que se extrae energía cinética y de la altura del fluido) por lo que los expertos llaman “condiciones de bloqueo”, por lo que también, es una aportación original el poder crear un modelo (adicional al de campo abierto) de turbinas en canales de agua (y redefinir este coeficiente de potencia) para su análisis y validación de la propia metodología, todo esto conociendo las ecuaciones de diseño de este tipo de sistemas, incluyendo el trabajar con modelos equivalentes eléctricos de la parte mecánica (símiles eléctricos) y poder entonces trabajar con todo el sistema, considerando la dinámica mecánica, electromecánica y electrónica.

2.14.- Conclusiones del estado del arte

Se ha demostrado que este tipo de turbinas hidrocinéticas de eje vertical, son ya una opción viable en diversas aplicaciones, una de ellas para electrificar casas rurales, aprovechando el recurso hídrico en ríos de bajo caudal o canales de riego. Existe un amplio interés en la última década por su estudio y análisis para esta y más aplicaciones. Existen trabajos que se enfocan principalmente (o en su mayoría) a la etapa de *CFD*, o diseño mecánico (materiales o diseño constructivo), sin

embargo, no hay mucha información respecto a la etapa de la electrónica de potencia asociada.

Respecto a metodologías de diseño de este tipo de sistemas de cosecha de energía, es poca la información, ya que solo se enfocan nuevamente en el área de diseño mecánico y *CFD*, con algunos softwares reconocidos como SolidWorks o Matlab/Simulink, sin embargo, hasta el momento de la elaboración de esta tesis, no se ha encontrado ninguna metodología de diseño integral de este tipo de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocínicas de eje vertical. Por lo que este tema de tesis de maestría, resulta una aportación original.

También el poder validar todo el sistema con apoyo del software LTspice, es también una aportación, ya que no existe en la literatura quien use este software para tal fin (a excepción de la tesis mencionada), y es importante mencionar, que más allá de simular el sistema completo como lo hacen otros softwares (como los mencionados anteriormente), se requiere el desarrollo de modelos únicos y confiables del comportamiento de las partes mecánicas, hidráulicas, eléctricas y la interconexión de dichos modelos, partiendo de ecuaciones de diseño y conociendo la dinámica del conjunto de elementos del sistema, donde se requiere elaborar modelos equivalentes eléctricos, de los comportamientos no eléctricos en el sistema, para poder realizar una simulación del mismo con el fin de poder validar y analizar el comportamiento y las variables del sistema.

En este trabajo de tesis se realiza un esfuerzo adicional para poder proponer un nuevo coeficiente de potencia, así como un estudio de la estimación del recurso hídrico útil al utilizar con este tipo de turbinas en campo abierto (río de bajo cauce) y canales de agua (canales de riego), donde es te último también es muy poco investigado hasta ahora y quedan múltiples esfuerzos por hacer, ante la evaluación de la eficiencia de este tipo de turbinas ante las condiciones por bloqueo del fluido y considerar entonces potencia extraíble no solo de la energía cinética, sino también de la de altura del recurso hídrico.

Por lo que se presenta un avance sustancial en el desarrollo de metodologías de diseño de este tipo de sistemas, creando una guía de diseño para el usuario que permita valorar la viabilidad y analizar diferentes criterios en la selección de los elementos, en el desarrollo e implementación de este tipo de sistemas que utilicen turbinas hidrocinéticas de eje vertical proponiendo cuatro situaciones o casos de estudio con diferentes circunstancias y proponiendo un coeficiente de potencia (C_p) para canales de riego que aprovechan el recurso hídrico de manera distinta a la teoría análoga de aerogeneradores (ya que no aplica el límite teórico de Betz) con la potencia extraíble de la altura, y de igual forma un modelo en LTspice con las condiciones mencionadas al instalar las turbinas en canales de agua (canales de riego).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA

Capítulo 3. Metodología de Diseño Propuesta

3.1.- Introducción metodología de diseño

A continuación, se muestra una nueva metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocinéticas colocadas ya sea en canales de riego o ríos de bajo cauce.

Al ser un sistema multidisciplinar, conlleva una complejidad involucrada, ya que es importante contemplar que algunas secciones del sistema pueden ser diseñadas o integradas a partir del conocimiento de sus ecuaciones teóricas y otras ecuaciones teóricas muy particulares respecto a este tipo de sistemas.

Este sistema involucra dinámicas de comportamiento mecánicas y eléctricas, por lo que el sistema se debe realizar acoplando todos los elementos entre sí, para lo que es necesario obtener sus respectivos modelos de comportamiento y unificar en el ámbito eléctrico la simulación del comportamiento de todo el sistema.

Para poder desarrollar esta metodología se utilizaron conocimientos teórico - prácticos de turbinas eólicas e hidráulicas, así mismo se utilizan conceptos de eléctrica, mecánica y electrónica.

La presente metodología de diseño, permite el desarrollo de sistemas de cosecha de energía hidráulica para electrificar viviendas rurales que se encuentren aisladas de la red y que se ajusten a las necesidades del usuario, brindando criterios, recomendaciones y consideraciones propias e importantes previamente evaluadas y analizadas con el fin de garantizar al usuario, poder contar con una guía de diseño para el desarrollo de este tipo de sistemas, con la ventaja de poder validar el sistema sin que este conlleve gastos adicionales, proponiendo ejemplos de casos de estudio, y de este modo brindar una alternativa de sistemas de cosecha de energía.

En la Figura 3.1, se muestra un diagrama de flujo que permite comprender de manera esquemática la forma en que se aborda la metodología de diseño.

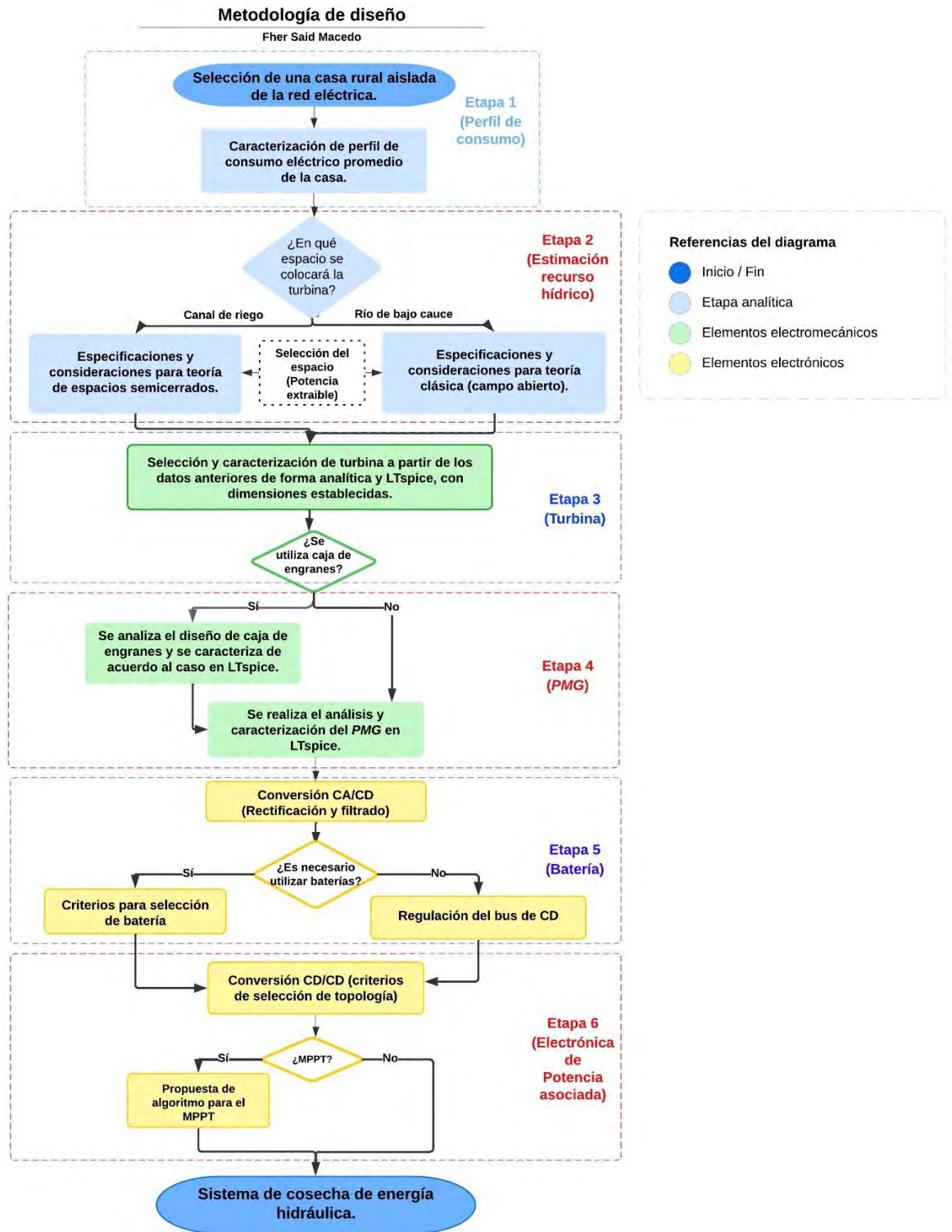


Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología de diseño.

Como se puede observar, la presente metodología de diseño se divide en tres etapas principales y a su vez en seis subetapas consecuentes, la primera etapa, es la etapa analítica (color azul), donde se analiza el perfil de consumo de la vivienda aislada de la red y la estimación del recurso hídrico (ecuaciones y consideraciones propias del espacio de instalación, que puede ser río o canales de agua).

La segunda etapa, es la de los elementos electromecánicos (color verde), donde se analizan, proponen y validan criterios para caracterización de la turbina, caja de engranes (en caso de utilizarse) y generador de imanes permanentes.

Por último, en la etapa número tres, los elementos electrónicos (color amarillo), donde se evalúa y se establecen criterios a considerar para la electrónica de potencia asociada del sistema con el fin de operar eficientemente en el proceso de conversión de energía y de almacenamiento (en caso de utilizarse).

3.2.- Alcances y limitaciones de la metodología

La presente metodología de diseño aborda cuatro casos de estudio específicos, con el fin de poder determinar cada uno de los elementos a considerar en el sistema de cosecha de energía hidráulica y garantizar el funcionamiento adecuado, esto en función de los dos espacios de instalación propuestos (río de bajo cauce y canal de agua).

Es importante destacar que, de acuerdo al espacio de instalación, es la forma en que se extrae potencia del recurso hídrico y por ende influye en el rendimiento de la misma turbina (esto se explica con mayor detalle más adelante en el apartado 3.4).

En el diagrama de la Figura 3.2, se muestra la clasificación de los casos de estudio que aborda la presente metodología en función de algunas consideraciones importantes de microturbinas de acuerdo a la forma de extraer energía del recurso hídrico y su grado de autonomía.

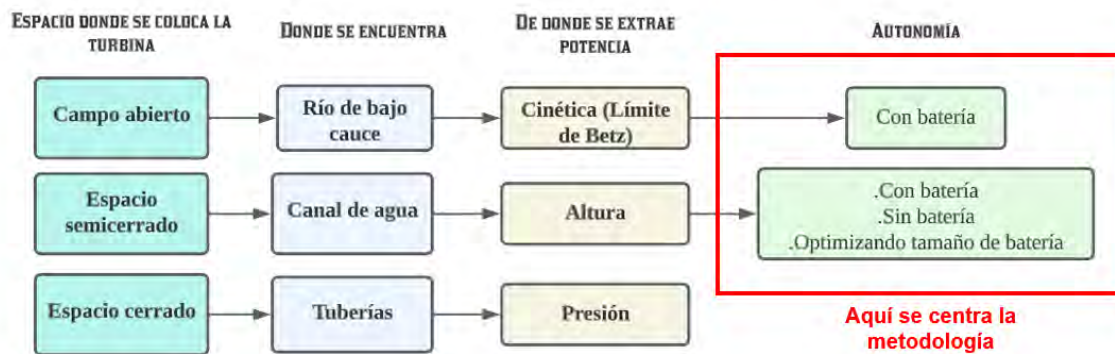


Figura 3.2 Clasificación de casos de estudio de la metodología de diseño.

De tal modo que se abordan cuatro casos de estudio, el primero un sistema de cosecha de energía tradicional con batería, colocando la turbina en ríos de bajo caudal. Por otro lado, tenemos tres situaciones bajo el mismo entorno de instalación, que es en un canal de agua, donde de acuerdo con el estudio y análisis realizado y que se desarrolla la explicación más adelante de cómo se puede extraer la potencia disponible en el canal de riego, se han propuesto diferentes alternativas de obtención del recurso hídrico, como es un sistema con batería (igual que el primer caso mencionado), otro en el que por la capacidad de generación de energía de acuerdo con el análisis realizado, se propone el caso de optimización del tamaño de la batería (pudiendo entonces hacer eficiente el sistema sin un método de almacenamiento de energía tan robusto), así como de un último caso, que es omitiendo la instalación de una batería, donde se propone usar una turbina de ciertas dimensiones que ante las condiciones por bloqueo, se pueda extraer cierta potencia que sea suficiente para poder electrificar la vivienda seleccionada.

Otro punto de importancia se destaca su uso en la presente tesis de maestría, es que se utiliza el software LTspice, software de acceso libre, gratuito y de baja exigencia de recursos del ordenador, donde cabe destacar que es una aportación original ya que más allá de utilizarlo para simular, se han desarrollado cada uno de los modelos de los elementos de la presente metodología de diseño, desde de los electromecánicos (turbina, *PMG* y caja de engranes), así como elementos de electrónica de potencia asociada (convertidores CA/CD, CD/CD, y máquina de

estados para el control del algoritmo *MPPT*), utilizando símiles eléctricos de la dinámica mecánica y electromecánica, que más adelante se explicará con mayor precisión.

Así mismo dentro de estas aportaciones originales, tenemos el desarrollo de modelos para turbinas en canales de agua, ya que si bien existen softwares que permiten la simulación de turbinas, estas utilizan los criterios de la teoría de energía eólica aplicando el límite teórico de Betz, el cual no aplica en canales de agua, por lo que es una muy interesante aportación, así mismo estas aportaciones se explicarán mejor en el capítulo 5 del presente documento.

Teniendo en cuenta estos alcances y limitaciones, así como la estructura de la metodología de diseño propuesta, entonces se procede a abordar cada una de las etapas previamente mencionadas, con el fin de poder desarrollar el sistema de cosecha de energía hidráulica, validando los resultados con el software LTspice.

3.3.- Etapa 1 – Perfil de consumo

Como primer paso de la presente metodología de diseño, considerando una vivienda rural aislada de la red eléctrica, y que la cual cuente con un canal de agua o río de bajo cauce cercano a ella, se tiene que dimensionar la potencia requerida de la vivienda para poder satisfacer de energía eléctrica la misma, esto con el análisis de los equipos eléctricos con los que cuente la vivienda y perfil de consumo.

3.3.1.- Análisis de equipos eléctricos con los que cuenta la vivienda

Para el desarrollo de la presente metodología y abordar los cuatro casos de estudio mencionados, se ha propuesto un perfil de consumo patrón, que permita validar y comparar cada una de las situaciones propuestas, y así contar con criterios que favorezcan en el desarrollo de este tipo de sistemas de cosecha de energía, por lo que considerando elementos de primera necesidad con los que cuentan mayormente este tipo de viviendas (casas rurales) [46], [47]. En la Tabla 1 se muestran los elementos eléctricos, junto con el tiempo de uso en un día promedio, así como del consumo de los mismos.

Equipo eléctrico	Potencia (W)	T. de uso (horas/día)	Consumo (Wh/día)
Focos ahorradores (7 de 10 W c/u)	70	6	420
Licuada	250	2	500
Radio AM	15	6	90
TV (32")	50	5	250
Congelador	165	24	3960
Refrigerador (de 8 a 11 p3)	135	24	3240
Extras (cargadores, indicadores, etc.)	15	6	90
Total:	700		8550

Tabla 1: Equipos eléctricos y consumo de la vivienda rural aislada.

Como se observa, son elementos de primera necesidad de acuerdo con datos estadísticos de últimos estudios realizados por parte de fuentes gubernamentales en México, es importante mencionar que los datos son una media, y que no necesariamente todos los casos serán iguales, ya que dependería de otros factores como cultura y necesidades específicas de la vivienda, sin embargo, sirve para poder realizar el análisis mostrado posteriormente. Con este conjunto de datos, podemos entonces determinar el perfil de consumo de la vivienda en un día patrón.

3.3.2- Perfil de consumo de la vivienda

Determinados los elementos eléctricos de (considerados como primera necesidad) con los que se cuentan en la vivienda, el perfil de consumo patrón de la misma se propone como el que se muestra en la Figura 3.3.

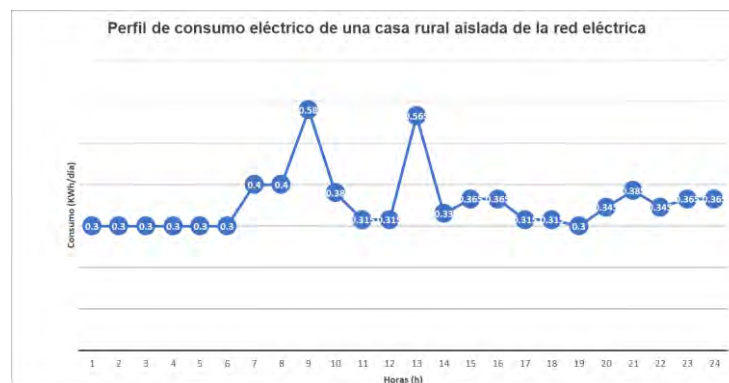


Figura 3.3 Perfil de consumo patrón de la vivienda rural en 24 horas.

Como podemos observar en la Figura 3.3 y de acuerdo con los datos de la Tabla 3.1, la vivienda tiene un consumo mínimo de 0.3 KWh y como pico de 0.58 KWh, con estos dos datos podemos dimensionar la forma en que nosotros podríamos satisfacer de electricidad la vivienda aislada de la red eléctrica, instalando las turbinas en canales de riego o ríos de bajo caudal, y aquí es importante demostrar el fundamento teórico de los casos de estudio propuestos en la presente investigación.

En la Figura 3.4, podemos observar de forma esquemática el mismo perfil de consumo, junto con diferentes hipotéticos perfiles de generación de conjunto de turbinas hidrocinéticas disponibles (línea amarilla, verde claro y verde oscuro), que evidentemente implicaría diferentes necesidades de almacenamiento, así como una hipotética curva de generación fotovoltaica (línea café), que evidencia las ventajas de utilizar fuentes de energía no intermitentes como la energía hidráulica.

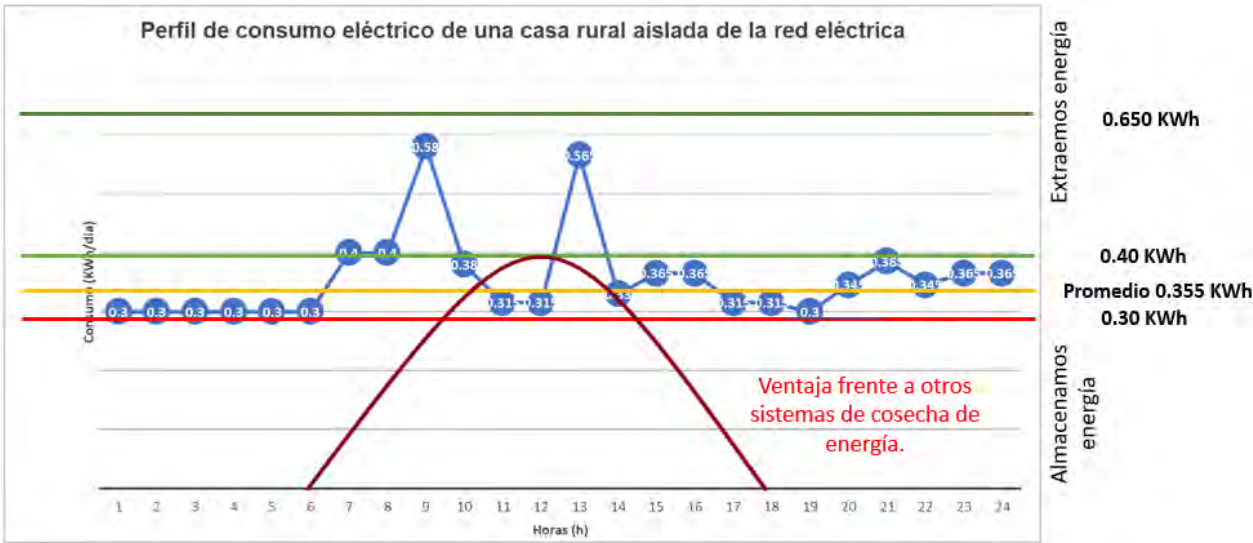


Figura 3.4 Perfil de consumo con diferentes capacidades de generación

En este esquema, se pueden observar múltiples elementos muy interesantes que permiten comprender fundamentos teóricos de los casos de estudio propuestos de la metodología. La primera es que el recurso hídrico al no presentar intermitencias (o no tan bruscamente como otras fuentes de energía renovables), denota una ventaja frente a otros sistemas se cosecha de energía, como los sistemas solares

(esto se ve en la curva característica que tienen este tipo de sistemas), ya que dependen de la irradiancia solar, por ejemplo; o los sistemas eólicos que dependen de la velocidad del viento, y por tal motivo se tienen que utilizar sistemas de almacenamiento de energía. Por el contrario, en este tipo de sistemas, al no tener intermitencias notables (salvo situaciones muy específicas y críticas como sequías), permiten entonces considerar capacidades de generación constantes en todo el día.

Se observan cuatro líneas horizontales, demostrando que al ser en mayor medida constante la generación de energía, y de acuerdo con el espacio de instalación, las dimensiones y características de la turbina (eficiencia), entonces se extraería diferente cantidad de energía, por lo que entonces se entiende y justifica el fundamento de utilizar diferentes casos de estudio en la presente metodología.

Al tener un comportamiento del sistema como la línea roja, entonces dependemos necesariamente de una batería, ya que solo somos capaces de generar apenas lo mínimo requerido en la vivienda, razón por la cual se tendría que utilizar una batería(s) que permitan brindar de autonomía al sistema en la mayor parte del tiempo. Por otro lado, al tomar de referencia la línea amarilla (de consumo promedio), entonces tenemos ahora dos situaciones, donde existirán momentos en que la vivienda pueda ser electrificada sin la extracción de energía de la batería (y permitiendo cargar la misma), pero tendría que seguir siendo primordial el uso de batería para la autonomía mencionada en el caso anterior.

Ahora observando las líneas verdes (de dos diferentes tonalidades), tenemos entonces que la vivienda puede ser electrificada sin complejidades e incluso podríamos optimizar el tamaño de la batería, ya que no requerimos de mayor autonomía como el primer caso, por ejemplo, por lo que el sistema sería más eficiente y rentable en la fabricación en esta selección del elemento de almacenamiento, ahora bien, y como parte ampliamente importante y destacable de la presente metodología, tenemos que si la generación de energía fuera como de la línea superior, entonces se tiene la capacidad de generación de energía para la vivienda incluso considerando en el omitir el uso de este elemento de almacenamiento, ya que como se mencionó, el recurso hídrico al no presentar

intermitencias, permite clarificar que la generación será constante en las 24 horas (salvo situaciones muy críticas que dependerán más del espacio geográfico de instalación). De esta manera se justifica también el utilizar cuatro casos de estudio en la presente metodología, utilizando como base teórica lo antes mencionado.

3.4.- Etapa 2 - Estimación del recurso hídrico

Una vez analizados los elementos eléctricos con los que cuenta la casa rural que se encuentra aislada de la red y caracterizado el perfil de consumo de la misma, entonces podemos proceder a la etapa de análisis y estimación del recurso hídrico (consultar el apartado de acrónimos al inicio del documento).

Inicialmente se tiene que seleccionar el espacio donde se colocará la turbina, en esta metodología propuesta y como ya se mencionó en apartados anteriores, solo existen dos variantes, como es un canal de riego (o canal de agua) o un río de bajo cauce. De este modo, tenemos que considerar diferentes características del espacio de instalación y ecuaciones propias de este espacio, así como otras variables importantes como la velocidad del fluido y la altura disponible para el dimensionamiento de la turbina.

Cabe mencionar que la presente investigación, representa también una aportación en este campo, donde ante el planteamiento de considerar ecuaciones de ambos espacios de instalación, derivó a cuestionamientos ampliamente interesantes y esfuerzos adicionales sobre los criterios a considerar en las turbinas instaladas en canales de riego y que se explica con mayor detalle en el apartado 4.4.2 y 4.4.3.

3.4.1.- Especificaciones y consideraciones (campo abierto)

Al considerar un río de bajo cauce, es indispensable conocer principalmente su caudal y velocidad de flujo. Es importante mencionar que la teoría de energía eólica es análoga a la teoría de energía hidráulica en campo abierto (ríos). Las velocidades promedio del fluido en ríos de bajo cauce, van de los 0.2 a 1.2 m/s [48], y

considerando esta información, entonces se explica con mayor detalle las ecuaciones de por medio si se instalan turbinas en ríos.

Inicialmente es importante conocer la fórmula de la energía cinética del agua, así como la densidad del fluido, en este caso agua dulce, ya que el agua salada aumenta en un pequeño porcentaje dicha densidad.

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot d \cdot v^2 \quad (1)$$

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Una vez planteado esto, tenemos la fórmula de la potencia total del agua, para poder entender la fórmula que consideramos para trabajar en este caso del río de bajo cauce.

$$P_{total} = \frac{E_K}{t} \quad (3)$$

Considerando:

$$v = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Tenemos entonces la fórmula simplificada, que representa la potencia teórica que nos permite trabajar como se muestra a continuación.

$$P_{teo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (5)$$

$$P_{teo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Ae \cdot v^3 \quad (6)$$

La eficiencia de estas turbinas, depende de algunos factores específicos, como sus dimensiones, materiales constructivos y tipo de turbina. Esta eficiencia está dada por el coeficiente de potencia (Cp). Tradicionalmente el coeficiente de potencia (Cp)

representa la cantidad de potencia en tanto por unidad que se puede extraer respecto a la potencia cinética de fluido. Esta potencia cinética es de donde extraemos energía en aplicaciones donde no es posible extraerla de la potencia de presión ni de la potencia de altura (aplicaciones en campo abierto).

Este concepto es ampliamente extendido en la bibliografía y es aplicable a turbinas eólicas y turbinas hidrocínicas en campo abierto (por ejemplo, el cauce de un río) donde la energía disponible por extraer sería únicamente la energía cinética del fluido y por ende existe el límite teórico de Betz, que menciona que no podemos extraer más del 59% de energía disponible del fluido [49].

Planteadas las ecuaciones y comentarios anteriores, se destaca que se pueden obtener las curvas de potencia teórica y potencia total que podemos obtener del fluido, es decir este rendimiento o coeficiente de potencia (C_p) respecto a una variable importante que es el *Tip Speed Ratio (TSR)*, en este caso del agua. Con esto podemos decir que la potencia extraíble se puede obtener de la siguiente forma:

$$P_{ex} = C_p \cdot P_t \quad (7)$$

Donde P_{ex} (W) es la potencia extraíble (potencia útil) obtenida en el eje de la turbina, C_p (p.u.) es el coeficiente de potencia que representa su eficiencia, ρ (kg/m³) es la densidad del fluido, A_e (m²) es el área del canal o de la turbina en cada caso, h_e (m) es la altura de fluido en el canal y V (m/s) es la velocidad del fluido antes de la turbina (o turbinas) y V_e (m/s), la velocidad a la entrada.

Adicionalmente se muestra la fórmula del *TSR*, que resulta ser la forma de representar la velocidad de rotación de la turbina normalizada a la velocidad de fluido, utilizando el *TSR (Tip Speed Ratio)*.

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (8)$$

Donde ω es la velocidad angular, R es el radio de la turbina y v , es la velocidad del fluido. Esta variable representa la velocidad del extremo del álabe respecto a la

velocidad del fluido. Por ejemplo, un $TSR=1$ significa que el extremo del álabe se mueve a la misma velocidad que el fluido.

Conocer estas ecuaciones y criterios de partida, nos permiten poder estimar el comportamiento de las turbinas de acuerdo al espacio de instalación (hasta ahora solo se ha hablado de las consecuencias y factores a considerar en ríos de bajo cauce) y es fundamental para la implementación de los elementos asociados en el desarrollo de este tipo de sistemas de cosecha de energía hidráulica.

Para fines prácticos, se ha desarrollado un script en Python (ver Anexo A), para poner en marcha cada una de las ecuaciones mostradas, obteniendo así las curvas teóricas de potencia mostradas en la Figura 3.5. En ese sentido es importante mencionar que la metodología de diseño no se limita al software que se utilice como herramienta para resolver las ecuaciones, ya que pueden ser utilizados otros como Matlab, Octave, entre otros.

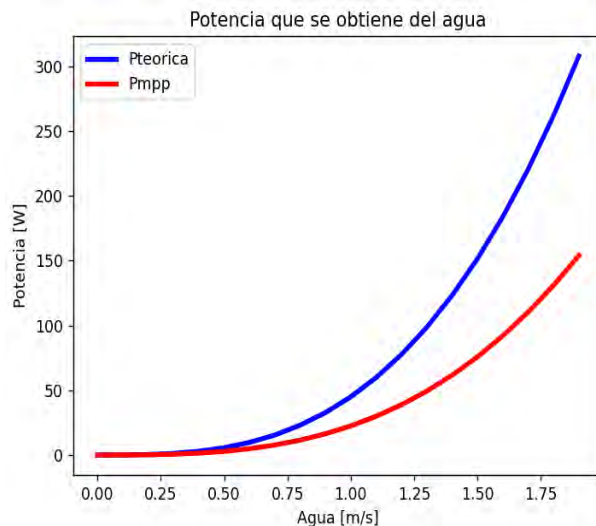


Figura 3.5 Curvas de potencia teórica y real extraíble en campo abierto.

Con esto, resulta idóneo trabajar sobre el punto de máxima potencia y para eso es necesario hacer un ajuste del modelo de la turbina, y así obtener el comportamiento hidrodinámico. Esto también respecto al *Tip Speed Ratio* (TSR) que resulta ser una de las variables más importantes, junto con las constantes $K1$ y $K2$.

Tenemos entonces que:

$$Cp = K1 \cdot \left(\frac{TSR_{vacio}}{TSR} - 1 \right) \cdot e^{\frac{-K2}{TSR}} \quad (9)$$

$$K2 = \frac{TSR_{vacio} \cdot TSR_{optima}}{TSR_{vacio} - TSR_{optima}} \quad (10)$$

$$K1 = \frac{Cp_{opt}}{\left(\frac{TSR_{vacio}}{TSR_{optima}} - 1 \right) \cdot e^{\frac{-K2}{TSR_{optima}}}} \quad (11)$$

Y estas fórmulas al insertarlas en un script de Python (ver Anexo B), nos permiten obtener el gráfico de la Figura 3.6.

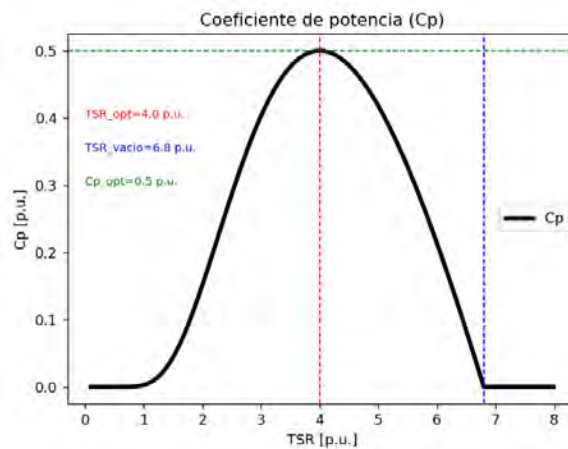


Figura 3.6 Coeficiente de potencia (ajuste hidrodinámico)

Con estas bases también podemos ahora abordar el caso del canal de riego que resulta bastante particular para la potencia que se puede aprovechar del fluido por las condiciones físicas del canal de riego, como la altura y ser un espacio semicerrado.

3.4.2.- Especificaciones y consideraciones (espacios semicerrados)

Ahora nos enfocaremos en los espacios semicerrados (canales de agua o canales de riego), donde como consecuencia de las condiciones de bloqueo del fluido (como lo llaman expertos del área), podemos extraer energía tanto de la energía cinética de fluido como de la energía de altura del mismo, por lo que la teoría análoga de energía eólica perdería sentido y entrarían conceptos teóricos del teorema de Bernoulli, por lo que se explica con mayor detalle a continuación, pero antes es importante conocer algunos puntos relevantes para asimilación de este conjunto de variables a considerar.

La velocidad de flujo promedio en un canal de agua puede variar significativamente dependiendo de varios factores, como la topografía local, el caudal del agua, el ancho, la profundidad del canal, y la rugosidad de la superficie del canal. Por lo tanto, es difícil proporcionar un valor específico para la velocidad de flujo promedio en un canal de agua sin conocer más detalles sobre el canal en cuestión.

En la Figura 3.7, se muestra un esquema de lo que sería la representación de variables importantes a considerar por el hecho de colocar una turbina en un canal de riego de forma rectangular (condiciones de bloqueo del fluido), para comprender mejor cada una de las unidades se puede ver la simbología del presente documento.

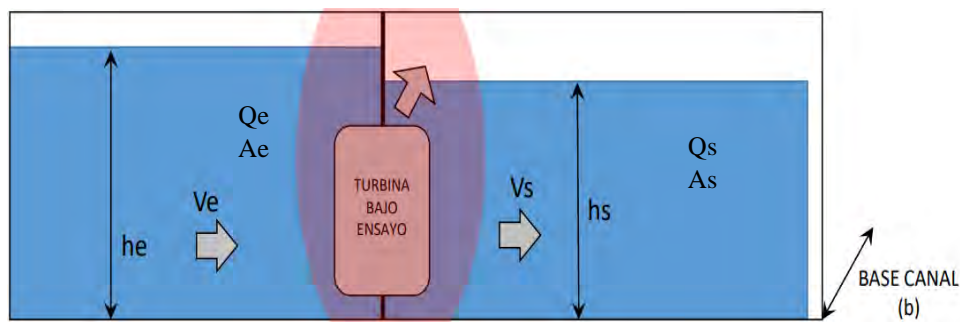


Figura 3.7 Esquema de un canal de agua rectangular con turbina bajo ensayo.

A partir de los gráficos que se ven en la Figura 3.7, podemos utilizar el teorema de Bernoulli para obtener el coeficiente de potencia que, a diferencia del caso de un río

de bajo cauce, este se ve afectado por ser un espacio semicerrado y que podemos extraer energía de la altura del fluido (h_e).

Con independencia del método utilizado para extraer energía del canal de agua (turbina o conjunto de turbinas), las dimensiones y características del propio canal de agua imponen limitaciones importantes a la cantidad de energía que se puede extraer del mismo, es decir, existen límites intrínsecos en los canales.

Primero se tiene que saber que existe energía disponible en el canal de agua, así como una energía que si es extraíble (como lo mencionado en la teoría de campo abierto en el apartado 3.4.1)

En este sentido es importante destacar que en la presente investigación existe una importante aportación en el análisis de límites intrínsecos de potencia extraíble en turbinas hidrocínicas al ser instaladas en canales de agua. Proponiendo la introducción de un C_{px} (Coeficiente de Potencia Extendido).

Tenemos entonces la ecuación puesta en términos de potencia, es decir, potencia de presión, potencia cinética y potencia de altura:

$$P_e \cdot A_e \cdot V_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_e \cdot V_e^3 + \rho \cdot g \cdot h_e \cdot A_e \cdot V_e \quad (12)$$

3.4.2.1.- Coeficiente de potencia extendido (C_{px})

En estas aplicaciones, el coeficiente de potencia tradicional (C_p) no sería representativo (como lo es en aplicaciones de campo abierto). En este trabajo, se propone la introducción de un coeficiente de potencia extendido (C_{px}) que representaría el tanto por uno de la potencia que se puede extraer respecto a la potencia extraíble, que en el caso de un canal de riego sería potencia cinética más la potencia de altura.

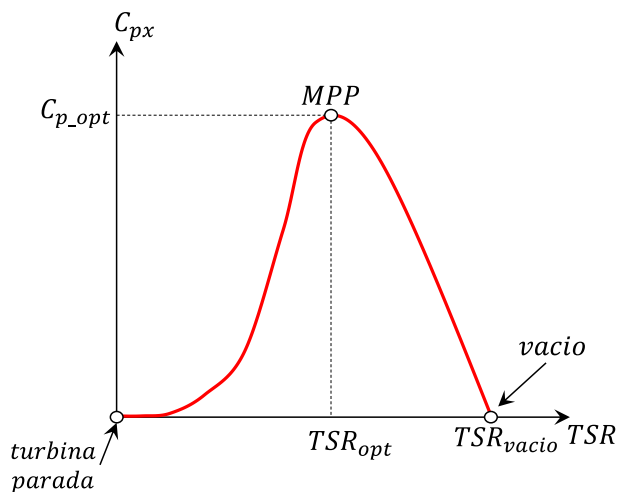


Figura 3.8 Coeficiente de potencia extendido (Cpx).

En la Figura 3.8 se muestra, un esquema de C_{px} respecto al TSR , que representa el punto máximo de potencia (Maximum Power Point, MPP), que, de acuerdo al diseño de cada turbina y de la aplicación, este será diferente. La Figura 3.8 muestra los puntos más significativos (turbina parada y operando en vacío), así como el punto de máxima potencia (MPP) objetivo de la etapa de electrónica de potencia.

A partir de los siguientes datos de la Tabla 2, se ejecuta un comparativa entre campo abierto y río de bajo cauce.

Variable	Río de Bajo Cauce	Canal de Agua
Radio turbina	0.20m	0.20m
Altura turbina	0.40m	0.40m
Base canal	N/A	0.40m
Altura canal	N/A	0.60m
Altura agua	N/A	0.50m

Tabla 2: Datos propuestos para comparativa campo abierto y canal de agua.

La Figura 3.9, muestra la potencia teórica (P_t) y la extraíble (P_{ex}) en el límite de Betz, para el caso de una turbina en campo abierto. Se observa claramente, que la

potencia disponible es únicamente la cinética. Cabe mencionar que en una turbina real los coeficientes de potencia serían mucho menores (p.e. $C_{px}=0.35$).

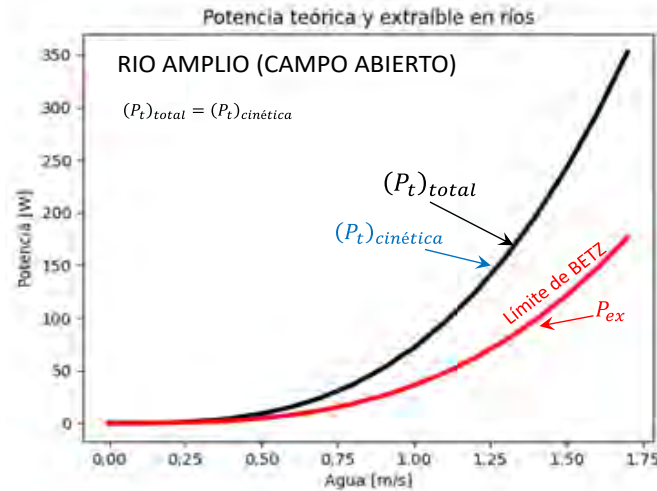


Figura 3.9 Coeficiente de potencia extendido (C_{px}).

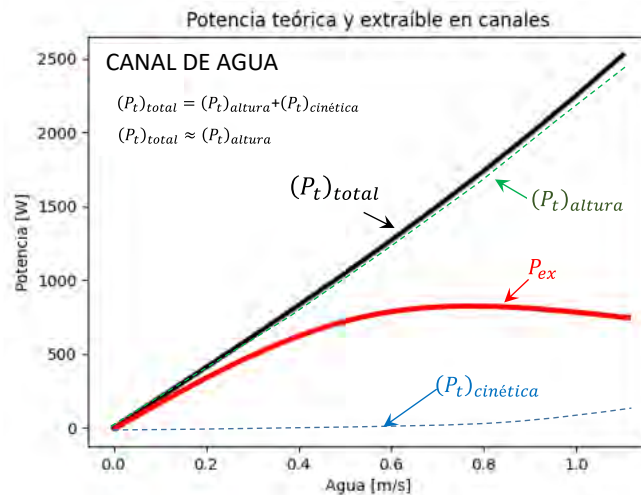


Figura 3.10 Coeficiente de potencia extendido (C_{px}).

En la Figura 3.9, se observa que a una velocidad de 1.75 m/s, podríamos llegar a obtener alrededor de 175W, por otro lado, en la Figura 3.10, se aprecia que en un canal de agua es mayor la capacidad de generación (resultado del análisis en un espacio semicerrado), ya que considerando que un canal de agua es menor la

velocidad de flujo, es aún mayor la potencia extraíble. Por ejemplo, a una velocidad de 0.4 m/s, podríamos extraer alrededor de 750W.

La Figura 3.10, muestra la potencia teórica (P_t) y la extraíble (P_{ex}) para un canal de riego de unas determinadas dimensiones (ver Tabla 3.2). Se observa que la potencia disponible es suma de la cinética y de la de altura, pudiendo afirmarse, que la cinética es prácticamente despreciable. La Figura 3.10, muestra también la máxima potencia extraíble (P_{ex}) obtenida analíticamente.

Este análisis se muestra en el Anexo C, donde se ejemplifica parte de los criterios y ecuaciones de este apartado. Es importante destacar del análisis realizado, que al extraer energía del fluido (con una o varias turbinas) la potencia cinética del fluido aumenta y la potencia de altura disminuye, con lo cual puede afirmarse que se ha extraído la energía principalmente de la altura del fluido.

Es decir, la caracterización de turbinas en canales de agua, depende de varios factores, ya que como se mostró en la Figura 4, al tratarse de un espacio semicerrado, se extrae energía principalmente de la altura del canal de riego, ya que depende de las dimensiones del canal (base y altura), así como de la altura del recurso hídrico disponible.

En la teoría, al colocar una turbina en un espacio de este tipo, el C_{px} , ya no se rige por el conocido límite de Betz, por lo que si utilizáramos este tradicional concepto de coeficiente de potencia (C_p) en lugar del extendido (C_{px}) podría darse la paradoja de encontrarnos con valores de C_p superiores a la unidad.

3.5.- LTspice para creación de modelos en la metodología

Explicada la parte teórica, conjunto de ecuaciones, y elementos importantes a considerar en el desarrollo de este tipo de sistemas (ya sea en canales de riego o ríos de bajo cauce), se brinda a continuación una breve explicación y consideraciones importantes respecto al uso de esta herramienta útil y poderosa (LTspice), para el correcto desarrollo y validación de la metodología de diseño.

Para la creación de modelos, se requiere de conocer el conjunto de utilidades base que permiten tal fin, como es panel principal (ver Figura 3.11), nuevo esquemático (ver Figura 3.12) y nuevo símbolo (ver Figura 3.13).

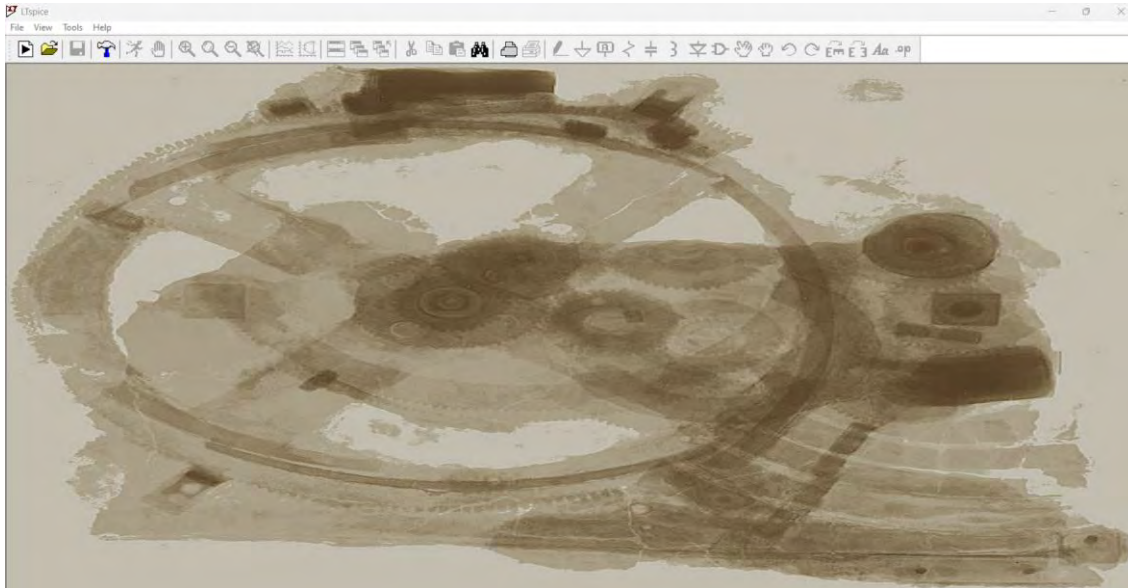


Figura 3.11 Panel principal LTspice

Esta interfaz, es la que nos permite seleccionar variantes de diseño de esquemas o circuitos eléctricos / electrónicos, por lo que después de estar en este entorno, procedemos a utilizar el apartado "File", y abrimos "New schematic" (ver Figura 3.12).

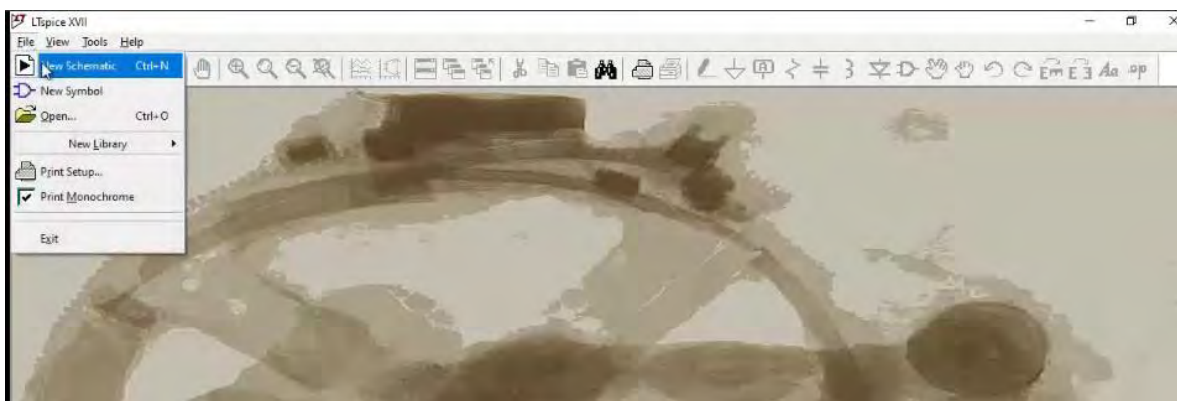


Figura 3.12 Creación de nuevo modelo.

Al seleccionar esta opción (o “New Symbol”), nos permite el desarrollo y creación de modelos a partir de elementos electrónicos de primera necesidad (como son resistencias, inductores, capacitores y diodos). La presente metodología utilizará ambas opciones de diseño para la creación de cada uno de los modelos del sistema de cosecha de energía. Posteriormente se genera un nuevo panel, y este a su vez habilita cada uno de los componentes, en la Figura 3.13 se muestra el conjunto de barras a conocer para poder desarrollar los elementos.

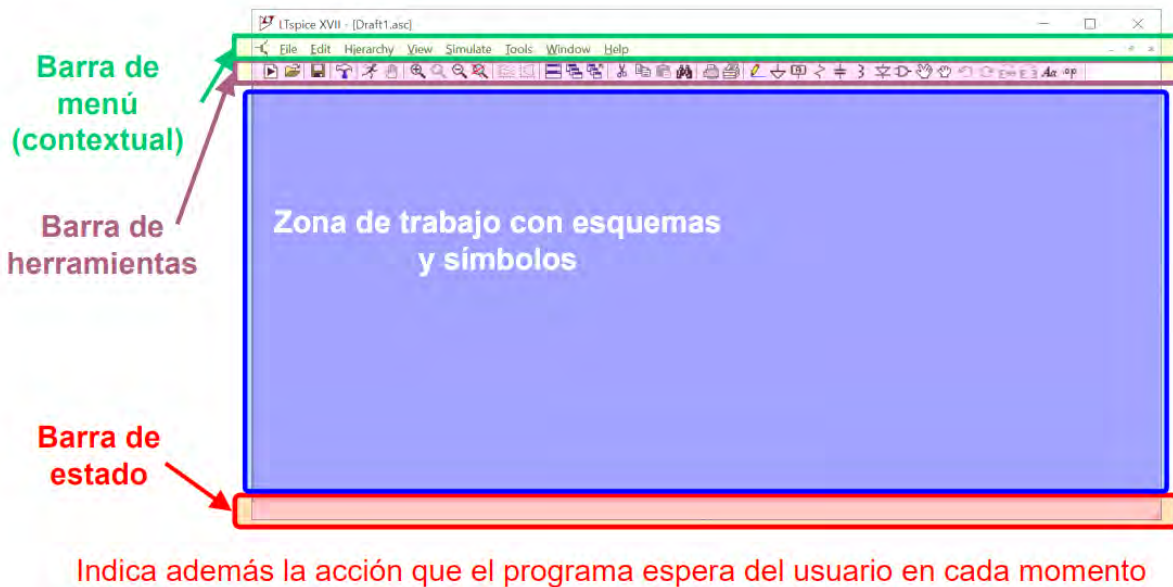


Figura 3.13 Conjunto de barras en LTspice

Alternativamente, en caso de crear el circuito esquemático, entonces se puede desarrollar el modelo de tipo símbolo, que sería la parte estética y visual de los elementos a partir de líneas y trazos. En la Figura 3.14 se muestra el apartado de símbolo.

En este espacio básicamente podríamos desarrollar los bloques con entradas y salidas para su posterior implementación en la simulación del sistema completo, es decir, un bloque por cada elemento del sistema, lo que resulta útil y es una de las justificaciones del uso de este software (adicional a que es libre y gratuito, así como con alta demanda de uso en los últimos años).

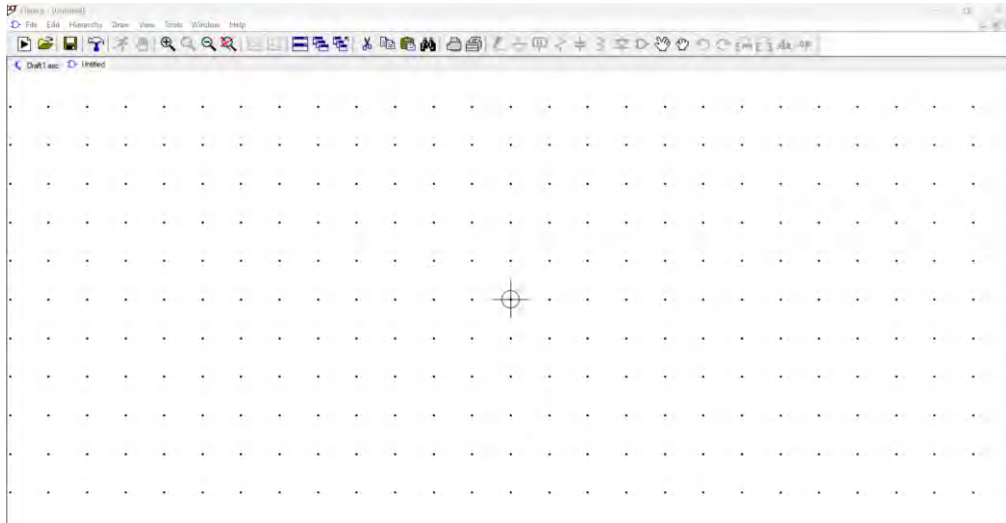


Figura 3.14 Creación de nuevo símbolo en LTSpice.

Posterior a la creación de estos modelos podemos entonces almacenarlos que después se podrán anexar como modelos propios del sistema, en el directo del conjunto de elementos (ver Figura 3.15). Por esto es imperativo que se utilice una sola carpeta específica para el desarrollo de los modelos de la presente metodología.

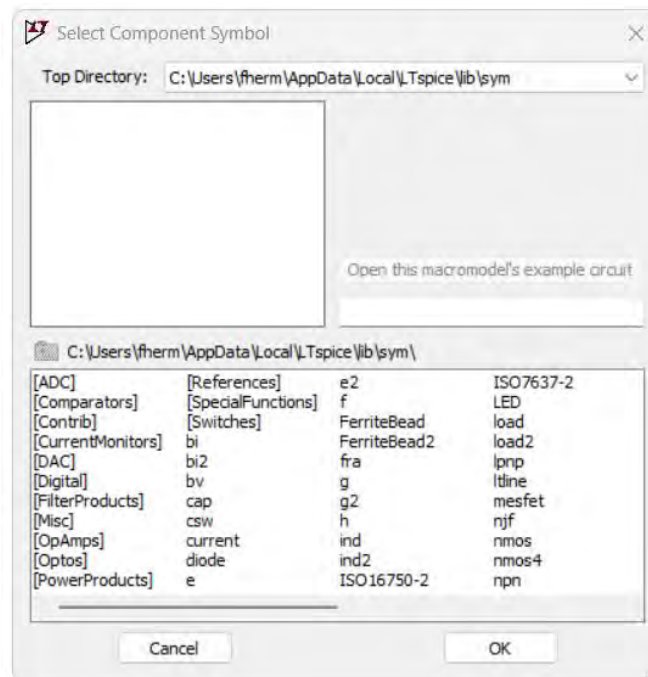


Figura 3.15 Directorio de modelos LTSpice.

Con este conjunto de elementos podemos entonces proceder a la creación de modelos de nuestro sistema de cosecha de energía, se requiere utilizar un punto de almacenamiento específico con el conjunto de esquemáticos y símbolos del sistema, es decir, una carpeta dedicada y específica con el fin de que el programa LTspice pueda funcionar adecuadamente en el proceso de desarrollo del sistema.

El desarrollo del conjunto de modelos del sistema de cosecha de energía, requiere del conocimiento de otros elementos del programa LTspice, como directas SPICE (que es el conjunto de sentencias que se pueden utilizar para el desarrollo de simulaciones), así como etiquetas, componentes principales, conexiones, y herramientas para mover o desplazar componentes. En la Figura 3.16 se muestran todos los componentes de la barra de herramientas para identificar su uso.



Figura 3.16 Conjunto de componentes y herramientas LTspice para creación de modelos

Con este conjunto de herramientas y consideraciones generales de LTspice, podemos entonces ahora desarrollar los siguientes pasos de la metodología de diseño, donde se caracterizarán cada uno de los elementos del sistema.

3.6.- Etapa 3 - Caracterización de turbina

La selección de la turbina dependerá principalmente del espacio disponible de instalación del sistema, (con la estimación del recurso hídrico previamente

explicado), ya sea en canales de riego o ríos de bajo cauce. Considerando entonces las condiciones que para tal caso importan en la estimación del recurso hídrico.

Como ya se explicó, la eficiencia de las mismas está dada por sus dimensiones, materiales de construcción, así como del coeficiente de potencia, si bien de acuerdo con la literatura la mayoría de estas no pasan del 35% de eficiencia, existen múltiples esfuerzos en torno al campo de mecánica de fluidos, en la constante búsqueda con pruebas experimentales con el fin de poder optimizar dicha eficiencia. A continuación, en la Tabla 3, se muestran los criterios más importantes a considerar para la caracterización de este elemento de generación de energía.

Criterio	Descripción
Caudal.	El caudal es la cantidad de agua que fluye a través de la turbina por unidad de tiempo, y es una medida importante para determinar la eficiencia de la turbina.
Velocidad de rotación.	La velocidad de rotación es la velocidad a la que gira la turbina, y es importante para determinar la cantidad de energía que se puede extraer de la corriente de agua, esto en relación al Coeficiente de Potencia (esto relacionado directamente con el <i>Tip Speed Ratio</i>).
Altura de caída.	La altura de caída es la diferencia de altura entre el nivel del agua en la entrada de la turbina y el nivel del agua en la salida de la turbina. Esta medida es importante para calcular la potencia que se puede obtener de la turbina.
Diámetro de la turbina (área de barrido)	El diámetro de la turbina es importante para determinar la cantidad de agua que puede pasar a través de la turbina, así como la velocidad a la que debe girar la turbina para obtener una cierta cantidad de energía.
Eficiencia hidráulica.	La eficiencia hidráulica es la relación entre la energía que se puede extraer de la corriente de agua y la energía que se requiere para hacer girar la turbina. Una alta eficiencia hidráulica significa que la turbina puede extraer más energía de la corriente de agua y convertirla en energía útil.
Coeficiente de potencia.	El coeficiente de potencia es una medida de la eficiencia global de la turbina, y se define como la relación entre la potencia útil generada por la turbina y la potencia total de la corriente de agua que fluye a través de la turbina.

Tabla 3: Criterios importantes para caracterización de turbina.

Para la caracterización de la turbina, es indispensable mencionar que la presente metodología de diseño parte de una previamente ensayada, es decir, partimos de un C_p dado, ya que esta metodología no aborda la etapa de dinámica de fluidos computacional que es previa a obtener dicho C_p , que es una de las actividades que hacen los expertos en mecánica de fluidos.

Es importante destacar que los programas que simulan turbinas principalmente utilizan el Coeficiente de Potencia tradicional, es decir, en función del límite teórico de Betz, pero como ya se mencionó, una de las contribuciones del presente trabajo, es el desarrollo de una simulación a partir de las ecuaciones y teoría de funcionamiento de cada uno de los elementos de este tipo de sistemas, donde se introduce el Coeficiente de Potencia Extendido (C_{px}), y entonces podríamos validar la simulación de turbinas instaladas en canales de agua (donde este límite teórico no tendría sentido de uso).

Se tiene que considerar algunos criterios importantes en el proceso de caracterización de la turbina y poder crear el modelo en LTspice, en este caso se crearían dos modelos (a partir del conocimiento del principio de funcionamiento y teoría de las turbinas).

3.6.1.- Elementos mecánicos de la turbina

Para la creación del modelo de la turbina en el software LTspice, es importante utilizar símiles eléctricos de los elementos mecánicos (par, momentos de inercia y coeficientes de rozamiento, por ejemplo), ya que este software está orientado para circuitos eléctricos. Así mismo, las magnitudes y variables que se mostrarán en el software serán siempre del ámbito eléctrico, por lo que debemos entonces trabajar en dicho régimen sin dejar de lado el cambio de variables de acuerdo con su equivalencia eléctrica de lo mecánico.

Esto se puede representar con la siguiente ecuación diferencial del acoplamiento de los dos elementos mecánicos más importantes del sistema, que son la turbina y el generador. Donde se encuentran momentos de inercia y rozamientos del sistema, así como velocidad angular y par.

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + (f_t + f_m) \cdot \omega_m = T_{mec} - T_{elec} \quad (13)$$

Para comprender mejor, se muestra a continuación (Figura 3.17 y 3.18) dos diagramas equivalentes de los elementos mecánicos y de los elementos eléctricos, con el fin de demostrar el sentido del uso de los símiles eléctricos.

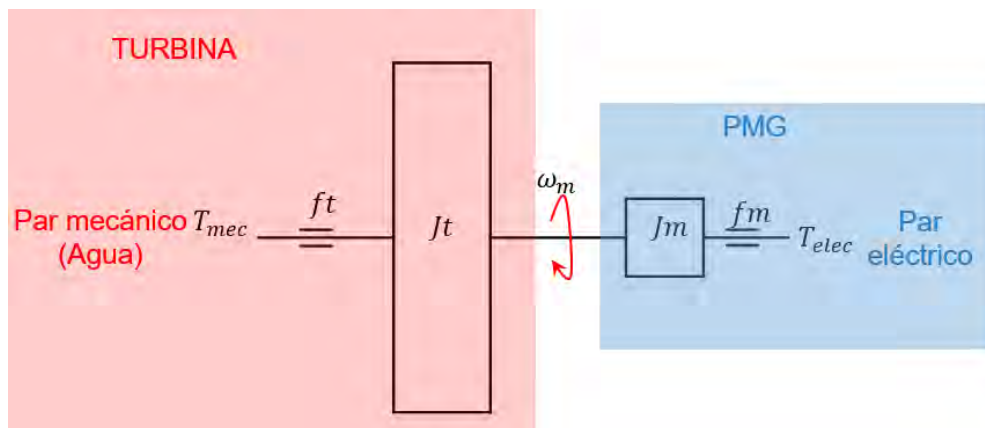


Figura 3.17 Diagrama de acoplamiento de elementos mecánicos del sistema.

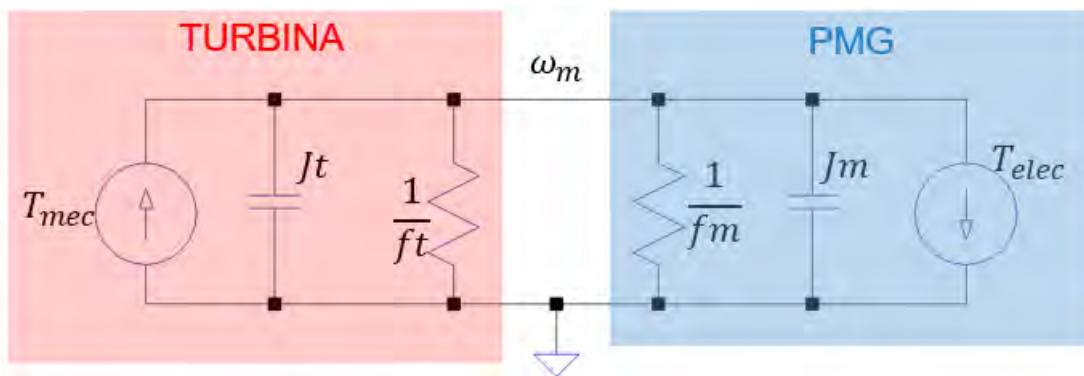


Figura 3.18 Diagrama de acoplamiento de elementos mecánicos del sistema con símiles eléctricos.

Para poder entender mejor, se tienen que considerar cuatro elementos importantes de estos símiles, como son tensión, corriente, capacitancia y resistencia, que respectivamente serían la velocidad angular (ω), par (T), momento de inercia (J) y rozamiento del sistema ($1/f$). Esto se puede validar al observar ambos esquemas y posición de los componentes.

Estos elementos mecánicos (utilizando símiles mencionados), se deben colocar en el modelo de la turbina y del generador de imanes permanentes con el fin de garantizar el correcto funcionamiento, ya que en caso contrario este tendría complicaciones al momento de simular dicho modelo.

3.6.2.- Incorporación de par de arranque

Una de las aportaciones de la presente metodología, es poder incorporar el par de arranque de la turbina para romper los momentos de inercia del arranque de la simulación con el fin de garantizar un correcto funcionamiento de la misma. Este par de arranque se incorpora junto con los elementos mecánicos de la turbina, de esta manera la visualización de los datos resulta más precisa desde el segundo uno de la misma simulación.

En la Figura 3.19, se muestran los elementos mecánicos de la turbina, así como este par de arranque mencionado, con el fin de garantizar cada uno de los puntos mencionados anteriormente. Estos a su vez son introducidos con sus respectivas variables, en función de una masa propuesta (solo con el fin de poder ejecutar la simulación), así mismo el par de arranque mencionado, depende directamente de condiciones del TSR de la turbina, que se detalla más adelante en el punto 3.5.3.

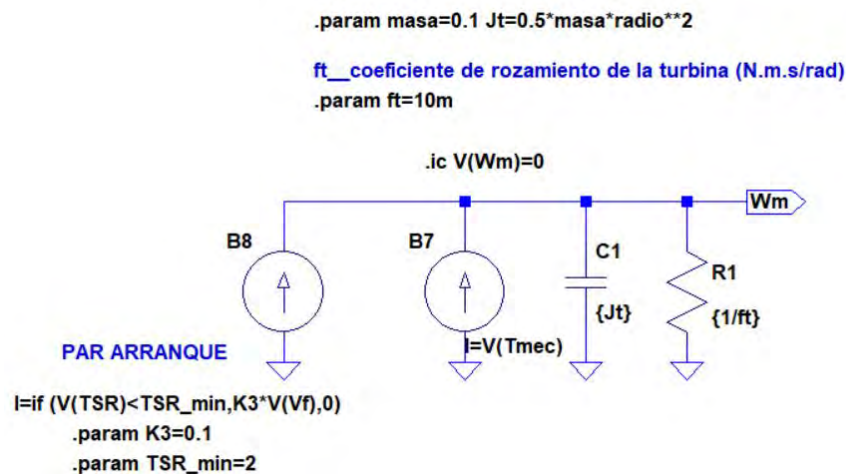


Figura 3.19 Modelo de elementos mecánicos turbina e incorporación de par de arranque.

3.6.3.- Modelo LTspice campo abierto

Determinado cada uno de los criterios anteriores, así como la estimación del recurso hídrico abordado en el apartado 3.4.1, en este caso se muestra en la Figura 3.20, el modelo de la turbina en LTspice que permitiría simular el comportamiento de la misma considerando instalarse en un río.

Cabe mencionar que este software para poder simular el comportamiento de entradas o salidas, se tienen que utilizar fuentes de voltaje y resistencias del orden de los kilos o mega ohm, con el fin de evitar errores en la simulación.

Se hace uso de la sentencia “.param” e “.ic” para poder colocar las respectivas variables y constantes del sistema, que se mostraron en el apartado 3.4 de la teoría general de turbinas hidrocinéticas en el presente documento, también se colocaron acotaciones con el fin de poder comprender mejor este modelo en LTspice.

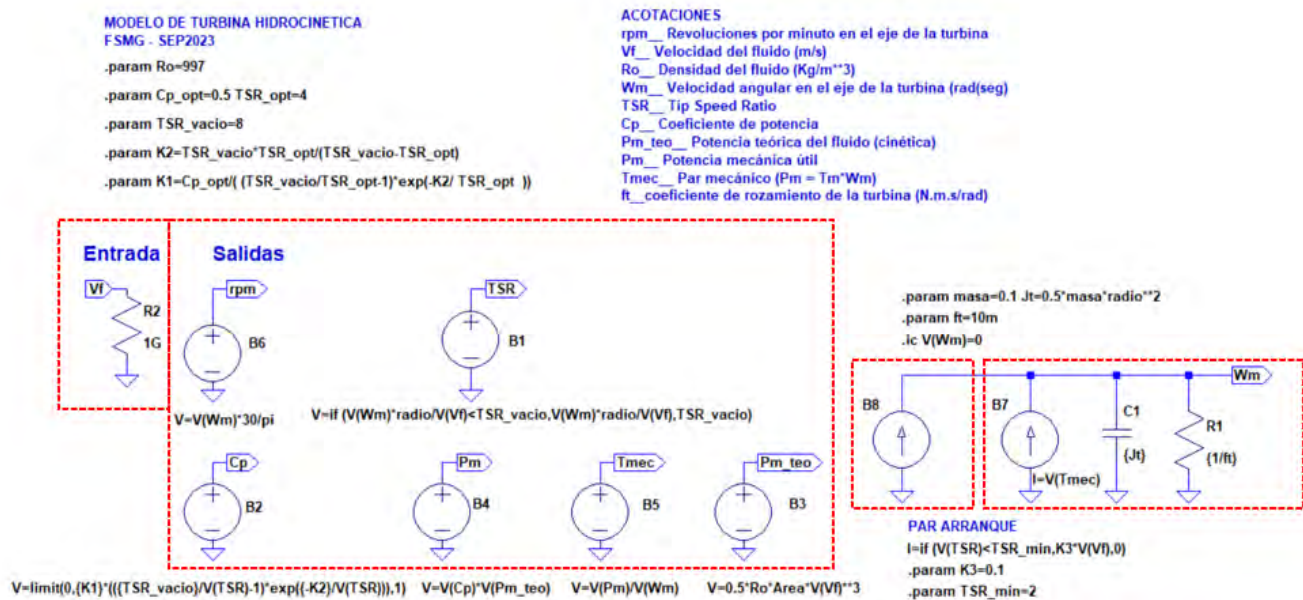


Figura 3.20 Modelo turbina (campo abierto) en LTspice parte interna.

Se puede observar que son variables de entrada y salida definidas y explicadas en los apartados ya mencionados en el párrafo anterior, así mismo se ve la incorporación de los elementos mecánicos y el par de arranque para la correcta

simulación de la misma, para posteriormente realizar el acoplamiento con el generador de imanes permanentes. Por último, se destaca que el C_p se considera de 0.5 como ejemplo de que el límite de Betz repercutiría directamente al ser campo abierto (río de bajo cauce), y como se mencionó, partimos de un C_p dado.

En la Figura 3.21 se muestra el modelo de la misma turbina desde la parte externa del bloque del modelo creado.

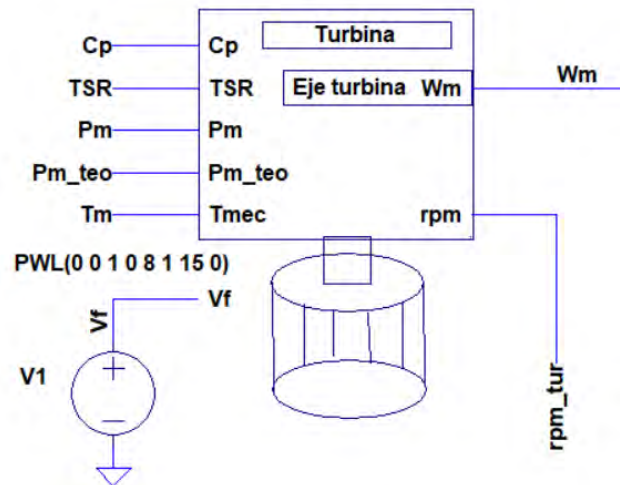


Figura 3.21 Modelo turbina en LTspice parte externa.

Se puede apreciar que las entradas y salidas declaradas en la parte interior, deben ser nombradas de la misma forma en la parte externa del modelo, con el fin de evitar problemas de simulación por nombres y asignación de variables.

También, la fuente de voltaje V1, es la que representaría la velocidad del fluido (en este caso río) el cual es la única entrada y la cual hace que las salidas sean directamente proporcionales en función de las ecuaciones de diseño.

Mediante un ajuste de simulación se pueden obtener diferentes tipos de datos que permiten comprender mejor el funcionamiento de la turbina y las variables y ecuaciones de diseño.

Por ejemplo, en la Figura 3.22, se muestra el resultado de la medición de una señal.

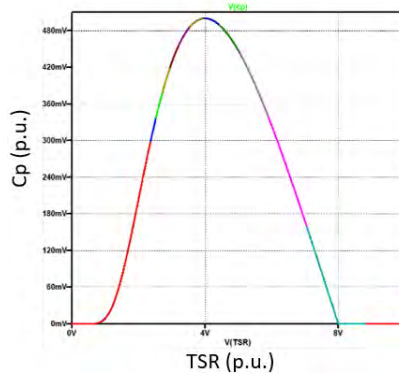


Figura 3.22 Ejemplo de señal obtenida de la turbina (Cp respecto a TSR).

3.6.4.- Modelo LTspice canal de agua

Considerando el caso anterior de la turbina, el caso de un canal de agua es de algún modo el mismo proceso a excepción de la incorporación de las ecuaciones explicadas en el apartado 3.4.2, donde el límite teórico de Betz no tiene sentido de uso por la demostración de los límites intrínsecos que existen por el hecho de colocar la turbina en el canal de agua, donde se comprobó que el recurso hídrico es mejor aprovechado ya que se extrae potencia no solo de la energía cinética, sino también de la altura del fluido. Por lo cual, se tiene el modelo que se muestra en la Figura 3.23.

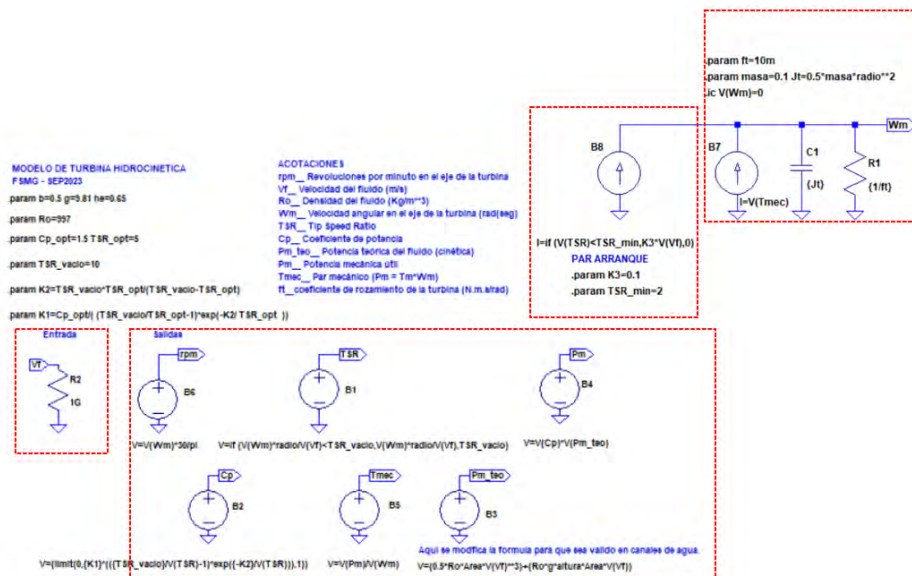


Figura 3.23 Modelo turbina (canal de agua) en LTspice parte interna.

Se aprecia que el modelo de la Figura 3.20 y Figura 3.23, son casi semejantes, tienen una única entrada (velocidad del fluido), diferentes salidas en función de los parámetros de las ecuaciones de diseño, así como la incorporación del par de arranque y los elementos mecánicos, sin embargo, el cambio radica en que la fórmula de la potencia teórica, cambia, ya que se extrae potencia no solo de la energía cinética, sino también de la altura del canal de agua, por lo que también al agregar dichas medidas del canal, repercuten directamente en tal modelo.

De esta forma se ha creado un modelo que permite evaluar el comportamiento de una turbina bajo las condiciones de instalarse en un canal de agua, lo que resulta una aportación ya que como se mencionó, no existen softwares que ejecuten la simulación de turbinas con este concepto C_{px} .

Ambos modelos son semejantes solo en la arquitectura externa, por lo que el modelo mostrado en la Figura 3.21, valdría para ambos casos y se podrían obtener las mismas señales de las variables en función de la velocidad del fluido (que en ríos de bajo cauce es mayor a la que podría existir en un canal de agua), así como del C_p que en canales de agua es mayor por no aplicar el límite teórico de Betz y poder extraer potencia de la altura del fluido, a diferencia de campo abierto que es la teoría es análoga a la de turbinas eólicas.

3.7.- Etapa 4 – Caracterización de caja de engranes y PMG

El uso de caja de engranes se tiene que evaluar, ya que, en términos de eficiencia, practicidad y costos de diseño del sistema, normalmente se busca omitir este elemento y priorizando mejor en diseño de turbina o *PMG*, sin embargo, a continuación, se muestran los criterios a considerar para poder agregar dicho elemento al sistema (en caso de deseárselo el usuario).

Se sobreentiende que la selección de una caja de engranes es directamente proporcional a las necesidades y características del conjunto turbina-*PMG* con el que se cuente en el proyecto, por lo que a continuación en la Tabla 4, se muestran los criterios más importantes en el desarrollo de este tipo de elementos secundarios.

Criterio	Descripción
<i>Relación de engranajes (Gear Ratio)</i>	La relación de engranajes determina la relación entre la velocidad de entrada y salida de la caja de engranajes. La elección de esta relación debe adaptarse a los requisitos específicos de la turbina y la generación de energía.
<i>Tipo de engranajes.</i>	Se deben seleccionar los tipos adecuados de engranajes que se adapten a las condiciones de operación y carga de la turbina. Los engranajes helicoidales, cónicos, y planetarios son opciones comunes en cajas de engranajes para turbinas, y cada tipo tiene sus propias características de rendimiento.
<i>Tamaño y peso.</i>	El tamaño y el peso de la caja de engranajes deben ser compatibles con el diseño general de la turbina y su instalación. Un diseño compacto y liviano puede ser especialmente importante en aplicaciones donde el espacio es limitado.
<i>Condiciones ambientales.</i>	Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la corrosión, deben tenerse en cuenta al seleccionar una caja de engranajes. Es importante que la caja pueda resistir las condiciones ambientales específicas del sitio de instalación.
<i>Costo.</i>	El costo de adquisición y mantenimiento de la caja de engranajes debe ajustarse al presupuesto disponible para el proyecto.

Tabla 4: Criterios importantes para caracterización de caja de engranes.

3.7.1.- Modelo LTspice caja de engranes

El modelo de LTspice, al igual que la turbina y generador de imanes permanentes, se tiene que ejecutar con base a los símiles eléctricos del campo mecánico previamente mencionados, en este caso tensión que sería velocidad angular (ω) y corriente que corresponde al par (T).

El modelo LTspice de la caja de engranes se muestra a continuación en la Figura 3.24 y Figura 3.25, subdivido en la arquitectura externa e interna del bloque diseñado.

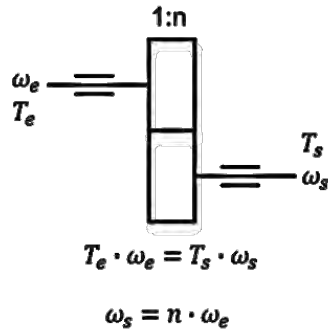


Figura 3.24 Modelo caja de engranes en LTspice parte externa.

Se comprueba que la caja de engranes tiene una entrada y una salida, y que en proporción a la relación de vueltas que exista entre ambas, esta afectaría directamente en la velocidad angular para el acoplamiento con el generador. Para poder desarrollar el modelo, se consideran condiciones ideales (sin pérdidas ni masas de inercia).

De acuerdo a los símiles eléctricos mencionados para la caracterización de la turbina, en este caso también aplicaría, por lo que sí de acuerdo a la Figura 3.24, tenemos que una caja de engranes es una relación entre un par y velocidad angular de entrada para consecuentemente tener un par y velocidad angular de salida, entonces tenemos que usar las variables tensión y corriente que son sus símiles, de este modo podemos ver la Figura 3.25 que representa esto.

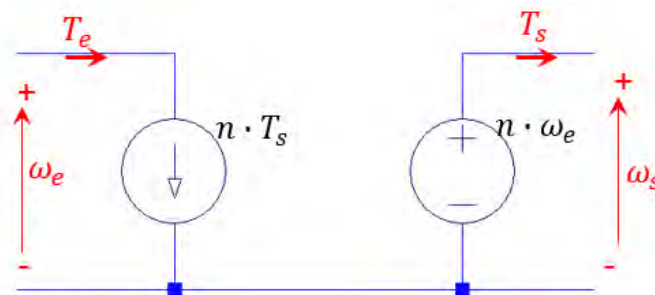


Figura 3.25 Modelo caja de engranes en LTspice parte interna.

El uso de la caja de engranes tendría que considerarse por cuestiones de practicidad y economizar, ya que resultaría un costo adicional un tanto innecesario en caso de que se desarrolle el adecuado análisis de promedio en la turbina y PMG, sin embargo, esta metodología expone tal caso en caso de requerirse según los criterios del usuario y necesidades del proyecto que se busque implementar.

3.8.- Caracterización del generador de imanes permanentes (PMG)

Una de las etapas ampliamente interesantes es el desarrollo del modelo del generador de imanes permanentes, el cual resulta requiere de ciertos conjuntos de conocimientos eléctricos, así como de conocer los símiles eléctricos que se utilizaron anteriormente.

Para caracterizar un generador de imanes permanentes para una turbina, es necesario llevar a cabo una serie de pruebas y análisis. Estas pruebas y análisis proporcionarán información sobre el rendimiento y las características del generador.

Anteriormente se había mencionado que en los sistemas eólicos o hidráulicos lo ideal es no utilizar caja de engranes, por cuestiones de presupuesto, así como de optimización, ya que resulta más conveniente en varios ámbitos el usar solo turbina con *PMG*, por lo que resultaría viable el análisis para la elección del *PMG* a utilizar de acuerdo a nuestro presupuesto, necesidades del sistema, o tamaño por cuestiones del espacio de instalación.

Para poder desarrollar la caracterización del *PMG*, dentro del entorno LTspice, debemos entender que este software es de diseño electrónico, por lo que se debe trabajar con símiles eléctricos, para poder desarrollar dicho modelo y no confundirnos al leer magnitudes o variables en términos eléctricos.

Adicionalmente, debemos entonces considerar que la turbina y el generador depende de la velocidad angular, número de polos y la K_v , y otros factores mecánicos, en el contexto de un generador síncrono de imanes permanentes, esta K_v se refiere al coeficiente o constante de velocidad-voltaje. El K_v en un *PMG* es

una medida de la relación entre la velocidad de rotación del generador y el voltaje de salida del mismo.

Para la creación del modelo del *PMG* en LTspice, se requiere conocer estos tres conceptos importantes ya mencionados, así como algunos otros de ingeniería eléctrica.

3.8.1.- Criterios importantes para su caracterización

Para caracterizar un generador de imanes permanentes se requiere de un conjunto de actividades o criterios previas para su selección e implementación en el sistema de cosecha de energía, los más importantes para incluso poder desarrollar el modelo en LTspice son los que se muestran en la Tabla 5.

Criterios	Descripción
<i>Kv del generador</i>	El K_v es una característica importante en los <i>PMG</i> , ya que permite establecer una relación lineal entre la velocidad de rotación del generador y el voltaje de salida, lo que facilita el control de la generación de energía y esto en términos mecánicos se debe adaptar a términos eléctricos.
<i>Curvas de voltaje-corriente (V-I).</i>	Estas pruebas se realizan para medir la relación entre el voltaje generado por el generador y la corriente que fluye a través de él. Se varía la carga conectada al generador y se registran los valores de voltaje y corriente correspondientes. Estas curvas ayudan a determinar la capacidad de carga del generador y su comportamiento en diferentes condiciones de carga
<i>Velocidad angular (ω)</i>	La velocidad angular (ω) en un generador de imanes permanentes es la velocidad a la que el rotor del generador gira alrededor de su eje. Se mide generalmente en radianes por segundo (rad/s) o revoluciones por minuto (RPM). La velocidad angular está relacionada con la velocidad lineal (la velocidad de la punta de las aspas o el extremo del rotor).
<i>Número de polos del generador</i>	El número de polos en un generador de imanes permanentes se refiere al número de pares de polos magnéticos opuestos en el rotor del generador. Cada par de polos consiste en un polo norte y un polo sur. El número de polos y velocidad angular (ω) en un generador de imanes permanentes son factores importantes que afectan la frecuencia de salida del generador y su velocidad crítica.

Tabla 5: Criterios importantes para caracterización de generador de imanes permanentes

3.8.2.- Modelo LTspice PMG

Para el desarrollo del modelo del *PMG* en LTspice (ver Figura 3.26), se requiere de conocimientos básicos de eléctrica y motores (fundamentos de la máquina síncrona) [50], ya que el conjunto de variables internas tiene que ver con teoría de tal tipo. Se requiere acoplar los elementos mecánicos del sistema con los respectivos símiles eléctricos, así mismo colocar tres fuentes de tensión junto con su resistencia e inductor (bobinado), esto para obtener corriente alterna trifásica.

Así mismo mediante el desarrollo del conjunto de ecuaciones correspondientes que permitan tener de acuerdo a un par inducido y una velocidad angular de la turbina, un par eléctrico y así corriente alterna trifásica desfasada 120°.

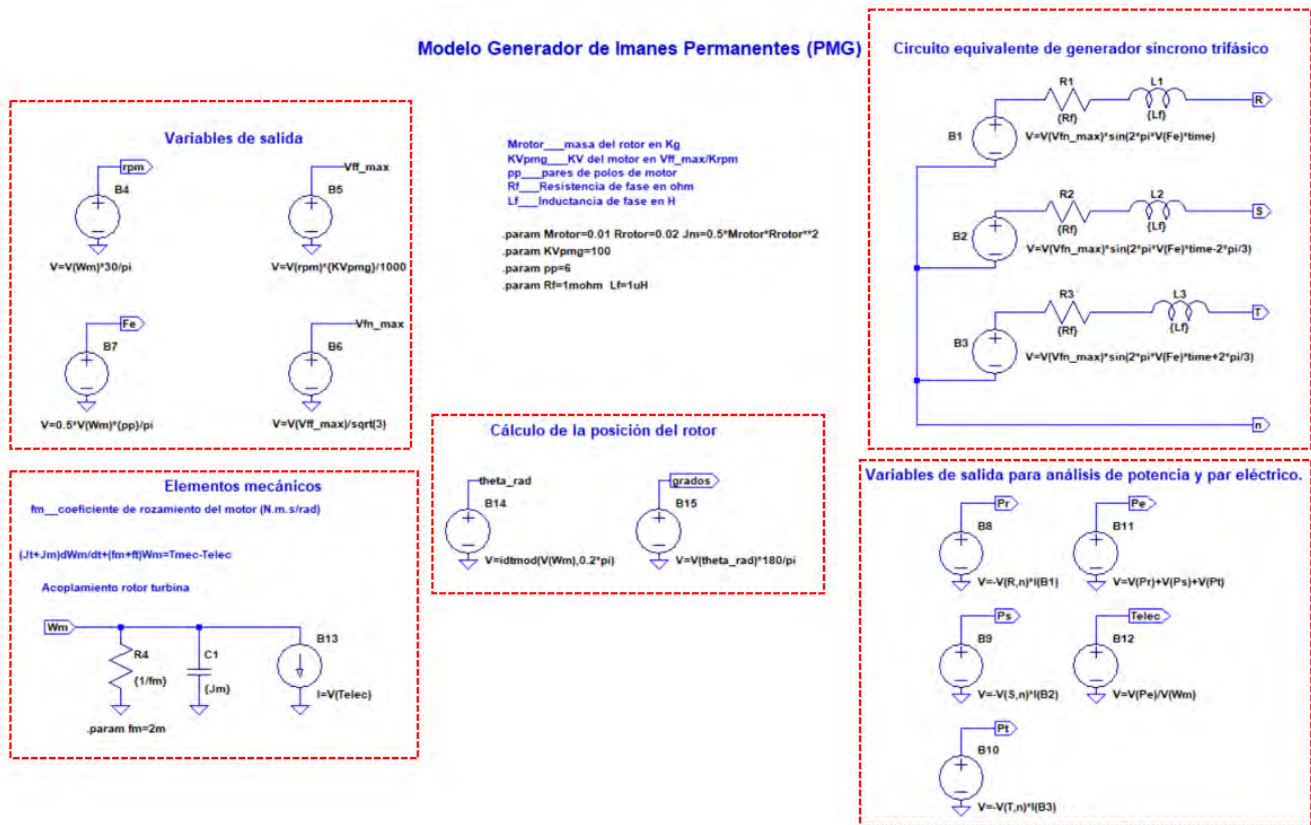


Figura 3.26 Modelo *PMG* en LTspice parte interna.

Desarrollado este modelo, se puede entonces considerar realizar el bloque en LTspice lo que permite de esta manera optimizar espacio y así poder tener múltiples

elementos y subelementos del sistema. En la Figura 3.27 se muestra el mismo modelo de la Figura 3.27, desde la parte externa del bloque con sus entradas y salidas asignadas.

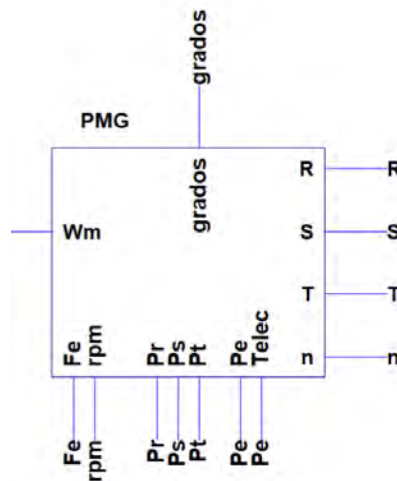


Figura 3.27 Modelo *PMG* en LTspice parte externa.

Este bloque nos permite analizar el comportamiento de las variables del *PMG*, como las fases, potencia entre esas fases, frecuencia eléctrica, así como otras más. Realizados ambos modelos de turbina y del generador, se puede realizar el acoplamiento entre ambos elementos, como se muestra en la Figura 3.28 se muestra un ejemplo del acoplamiento de la turbina con el *PMG*.

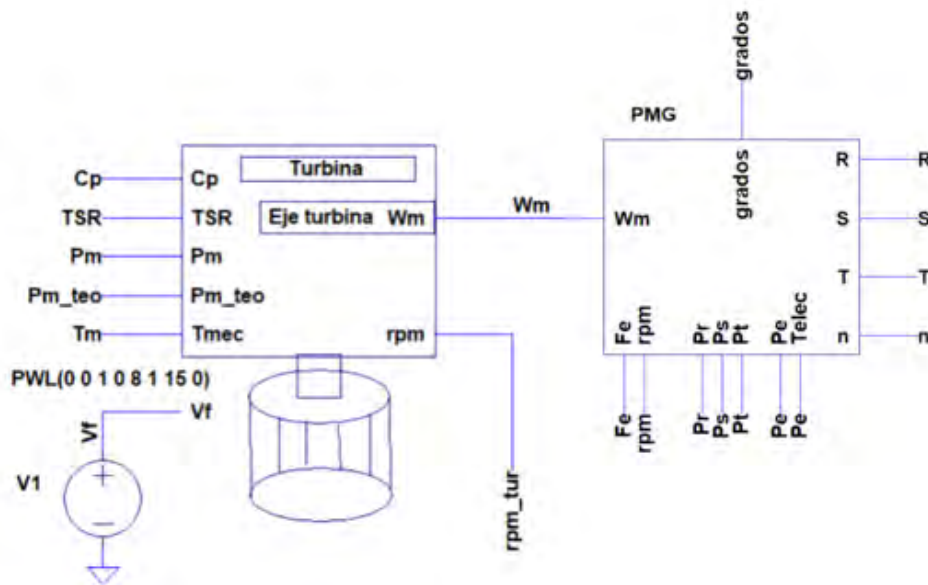


Figura 3.28 Acoplamiento turbina + *PMG*.

Con este acoplamiento, entonces podemos validar el funcionamiento de ambos elementos con el fin de poder demostrar que los símiles eléctricos utilizados, junto con las ecuaciones mostradas para el desarrollo de ambos modelos, permiten la adecuada caracterización de la turbina y el generador de imanes permanentes. En la Figura 3.29, se muestra un ejemplo de cómo al realizar el acoplamiento, en la tensión de salida del alternador obtenemos una señal de corriente alterna trifásica, o, en otras palabras, una señal variante en el tiempo provocada por un movimiento relativo entre punto A y B del acoplamiento de la turbina y generador.

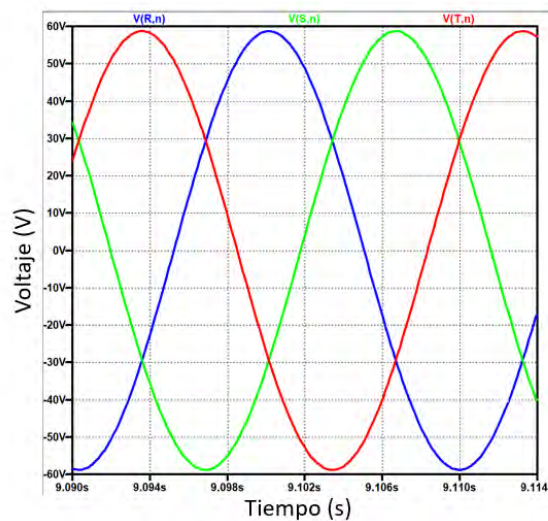


Figura 3.29 Corriente alterna trifásica de salida del PMG.

Hasta este punto obtenemos entonces la conversión cinética del agua a mecánica con la turbina, y de la turbina al generador obtenemos electromecánica, por lo que ahora se deja de utilizar símiles eléctricos del sistema orientando ya todo en términos eléctricos.

3.9.- Etapa 5 - Criterios para selección de batería.

En el marco teórico se habló acerca de los sistemas de almacenamiento de energía principales en los sistemas de cosecha de energía, como son baterías, volantes de inercia, supercondensadores, bombeo de agua y celdas de combustible. Sin embargo, esta metodología solo aborda el caso de baterías, las cuales son las más

utilizadas y accesibles en el contexto del que hablamos de viviendas rurales aisladas de la red eléctrica, así mismo, se propusieron casos de estudio donde incluso se puede omitir su uso, por lo que a continuación nos enfocaremos en este tipo de *SAE*.

Como primer punto se tiene primero que decidir si se usa o no batería con base a los criterios mostrados del apartado 3.3 a 3.7 del presente documento (lo que es una alternativa y que se presenta como ventaja en este tipo de sistemas de cosecha de energía a diferencia de otros), como es la estimación del recurso hídrico de acuerdo al espacio de instalación (río de bajo cauce o canal de riego), y esto viene demostrado en el diagrama de flujo de la Figura 3.1, donde en caso de no requerir usarla, se puede entonces ir al apartado 3.9, y en caso de si utilizarla, se tienen que tomar en cuenta algunos criterios.

En el caso de cosecha hidráulica, se tienen amplias ventajas frente a otros sistemas como es el caso de los sistemas solares o eólicos, ya que el flujo de agua es en mayor medida constante (a diferencia de la irradiancia solar y velocidad del viento), lo que permite tener un flujo de agua relativamente similar las 24 horas (es decir, no presenta intermitencias), y que solo este podría ser afectado en situaciones de sequía o lluvias, o dicho de otro modo, casos ambientales muy críticos, pero esas consideraciones estarían más sujetos dependiendo de la zona geográfica donde sea colocado el sistema de cosecha de energía hidráulica.

Para entender mejor en cuál de los casos se utiliza, optimiza su tamaño o no se utiliza batería, podemos observar también la Figura 3.4, que explica con el perfil de consumo patrón propuesto, diferentes escenarios en función de diferentes capacidades de generación.

Para la selección de la batería a utilizar de este caso de estudio, tenemos que usar como referencia la potencia de todos los elementos conectados a la vez, que sería el punto crítico de uso, así como los dos casos mostrados en el perfil de consumo que serían los picos en el tiempo de mayor consumo. Con el dato de 700 W pico, y los 0.580 KWh y 0.560 KWh de pico de consumo, así como 8.550 KWh de consumo, se puede determinar las capacidades mínimas.

Para comprender mejor, se desarrolló una subclasificación en este mismo apartado con recomendaciones en función de las necesidades del sistema a desarrollar, ya sea una batería con mayor capacidad u optimizando su tamaño, en la Figura 3.30 se muestra un esquema de tales criterios.

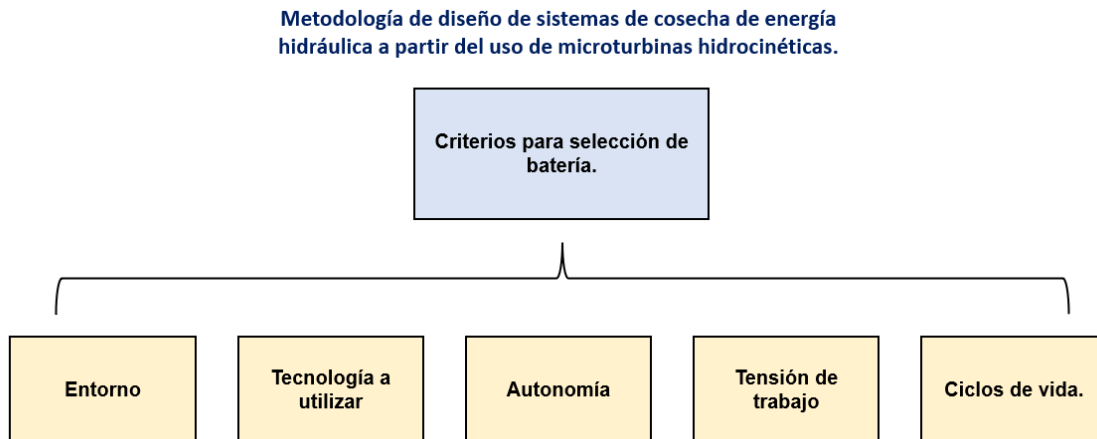


Figura 3.30 Criterios para selección de batería.

3.9.1.- Entorno

El primer punto a considerar es el entorno de instalación del sistema, ya que repercute en el correcto funcionamiento y por cuestiones de seguridad (cuidando algunas condiciones como la temperatura, por ejemplo), el adecuar la batería a tal espacio, ya que en caso de usar una tecnología que no tenga tolerancia a altas temperaturas ambientales (como una de plomo-ácido) podría llegar a explotar, o en caso contrario, si la temperatura fuera muy baja, las propiedades químicas constructivas de estos elementos, afectarían el desempeño de la batería. Por lo que este criterio es de alta importancia [51].

El mantenimiento también es un aspecto que se debe tomar en cuenta en este tipo de elementos, ya que, de acuerdo al entorno de instalación, algunas baterías podrían requerir de mayor o menor mantenimiento en función de lo que sugiera el fabricante.

3.9.2.- Tecnología a utilizar

La elección de la tecnología adecuada depende de las necesidades del sistema y del presupuesto disponible, en este caso se busca optimizar en todos los sentidos la selección de esta. Sin embargo, es importante mencionar que las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) son un tipo de batería recargable de iones de litio que se utilizan como una alternativa más segura a las baterías de iones de litio convencionales y son mayormente utilizadas en los sistemas de cosecha de energía, como la solar, eólica e hidráulica [52].

- **Baterías de Ion de Litio (Li-ion):** Las baterías de ion de litio son ampliamente utilizadas debido a su alta densidad de energía, larga vida útil y bajos niveles de autodescarga. Son ideales para aplicaciones de cosecha de energía donde el tamaño y el peso son consideraciones críticas.
- **Baterías de Polímero de Litio (Li-Po):** Similar a las baterías de ion de litio, las baterías de polímero de litio son delgadas y ligeras, lo que las hace adecuadas para dispositivos con restricciones de espacio.
- **Baterías Recargables de Ion de Litio de Estado Sólido:** Estas baterías están en desarrollo y ofrecen la promesa de una mayor seguridad y densidad de energía en comparación con las baterías de ion de litio convencionales. Aunque aún están en las etapas iniciales, se espera que encuentren aplicaciones en sistemas de cosecha de energía en el futuro.
- **Baterías de Flujo:** Las baterías de flujo utilizan electrolitos líquidos almacenados en tanques separados, lo que les permite ser escalables y ofrecer una mayor vida útil. Son adecuadas para aplicaciones estacionarias donde el tamaño y el peso no son críticos.
- **Baterías de Plomo-Ácido:** Aunque tienen una menor densidad de energía en comparación con las baterías de ion de litio, las baterías de plomo-ácido son conocidas por su bajo costo. Son adecuadas para aplicaciones en las que el costo es un factor crítico.

- Baterías de Níquel-Metal Hidruro (NiMH): Aunque han perdido popularidad en algunos mercados, las baterías NiMH todavía se utilizan en ciertas aplicaciones de cosecha de energía debido a su relativa seguridad y menor impacto ambiental en comparación con las baterías de níquel-cadmio.
- Baterías de Sal de Agua: Estas baterías utilizan agua y sal para almacenar energía. Son una opción sostenible y adecuada para aplicaciones donde la disponibilidad de agua es abundante.

3.9.3.- Autonomía del sistema

La autonomía de un sistema de almacenamiento de energía con baterías se refiere al tiempo durante el cual el sistema puede suministrar energía a una carga específica antes de que sea necesario recargar o reemplazar dicho elemento.

La elección de la batería adecuada para garantizar la autonomía deseada es crucial y depende de varios factores, así mismo diferentes autores sugieren brindar al menos medio día de autonomía [53].

- Capacidad de Almacenamiento (Ah o Wh): La capacidad de almacenamiento de la batería se mide en ampers-hora (Ah) o Watts-hora (Wh). Es la cantidad total de energía que la batería puede almacenar y suministrar. Cuanta mayor sea la capacidad de almacenamiento, mayor será la autonomía del sistema.
- Consumo de Energía de la Carga (W): La carga conectada al sistema tiene un consumo de energía específico, medido en Watts (W). Multiplicar el consumo de energía por el tiempo de operación deseado proporcionará una estimación de la capacidad de la batería requerida.
- Eficiencia del Sistema: Las pérdidas en el sistema, como las conversiones de energía y la eficiencia de las baterías, deben tenerse en cuenta al calcular la autonomía real del sistema. Por ejemplo, la etapa de conversión de energía, la eficiencia del PMG, o de la vida útil de la turbina que se puede ver afectada por fallas como rotura de palas, obstrucción de las mimas por

elementos internos o externos, así como suciedades, por lo que debe considerarse con base a la eficiencia de nuestros elementos del sistema.

3.9.4.- Tensión de trabajo y ciclos de vida

Por último, se tiene que considerar la tensión de trabajo de la batería, esto con el enfoque de seguridad, es decir, trabajar con tensiones que no sobrepasen lo permitido en este sentido, por ejemplo, 12V, 24V, 36V y 48V, considerando también que, a mayor tensión, sería menor corriente y también juega un papel importante en la seguridad del usuario y del sistema. Por el contrario, utilizar baterías del orden de los 96V o 128V, no sería tan viable ni por economía, ni por seguridad del usuario, por lo que al seleccionar la tensión se debe tener en cuenta estas consideraciones.

Por último, los ciclos de carga y descarga de la batería repercutirían en la vida útil, por lo que si se quiere un sistema con bajo mantenimiento (ya que es una casa rural asilada de la red), se deben considerar tecnologías de baterías que tengan mayores ciclos de vida útil con el fin de mantener un sistema funcionando en contextos aislados de la red y rurales.

3.10.- Etapa 6 - Electrónica de potencia asociada

Una de las etapas imprescindibles en el diseño de este tipo de sistemas de cosecha de energía hidráulica, es la electrónica de potencia utilizada, como son el convertidor CA/CD (rectificador), la topología del convertidor CD/CD (en función de las necesidades), así como del uso de convertidores CD/CA (inversores).

En la presente metodología, se abordan los primeros dos, ya que se rectifica la tensión de salida del conjunto turbina-PMG, así como posteriormente se entrega un Bus de CD regulado con el fin de cargar una batería en caso de utilizarla, o en su defecto, se utiliza el convertidor CD/CD como fuente conmutada en caso de no utilizar batería.

3.10.1.- Convertidor CA/CD (rectificador)

En el contexto de turbinas eólicas o hidráulicas, los rectificadores juegan un papel crucial en la conversión de la energía generada por el *PMG* en corriente alterna (CA) a corriente directa (CD). La generación de electricidad a partir de este principio de funcionamiento del generador, Sin embargo, para ser utilizada en la red eléctrica o almacenada en baterías, la energía debe ser convertida a corriente directa, por lo que existen algunas arquitecturas de rectificadores trifásicos, como lo son los controlados y no controlados.

En sistemas de cosecha de energía usualmente se utilizan los rectificadores trifásicos no controlados por fines prácticos y económicos, contextualizando también que el proyecto se busca en su mayor medida económico por ser una casa rural aislada de la red y no requiere de elementos sofisticados.

Para la creación del modelo en LTspice, se requiere de utilizar diodos ideales (o en condiciones ideales), con el fin de poder ejecutar la simulación de forma limpia, sin embargo, valdría cualquier diodo que se seleccione que cumpla con los requerimientos técnicos de tensión y corriente pico.

En la Figura 3.31 se muestra el modelo creado en LTspice incorporando el puente de diodos ideales.

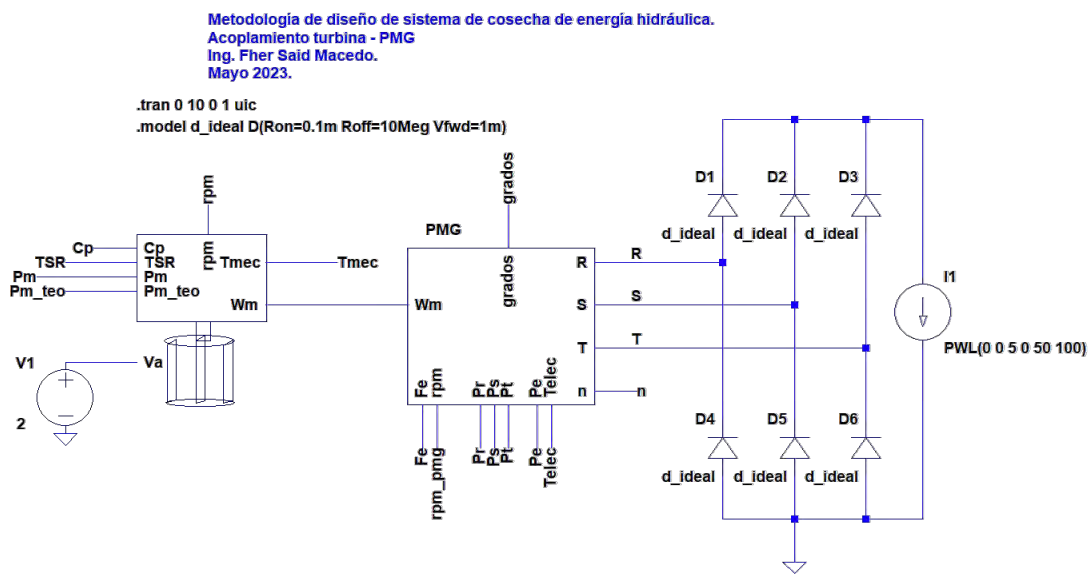


Figura 3.31 Modelo turbina-PMG en LTspice con la incorporación de rectificador.

De esta manera, entonces podemos validar el funcionamiento del rectificador ejecutando la simulación, obteniendo la señal de la tensión de salida (del conjunto turbina, PMG y rectificador), que se muestra en la Figura 3.32.

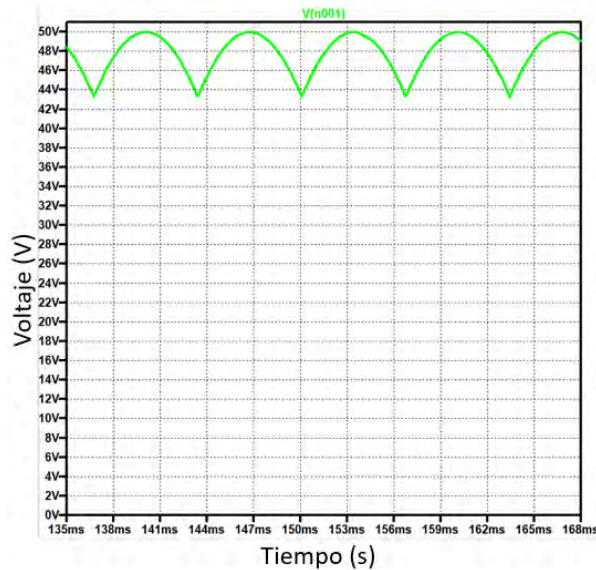


Figura 3.32 Tensión de salida del rectificador.

3.10.1.1.- Modelo simplificado *PMG* con rectificador

Ante el desarrollo de los modelos previamente mostrados, utilizando símiles eléctricos para introducir los elementos mecánicos del sistema, se debe considerar que la dinámica de la parte mecánica es en mayor medida lenta que la eléctrica/electrónica, por lo que en el desarrollo de la presente investigación se crearon modelos que permitieran reducir o discriminar cierta parte de esa dinámica para poder simular todo el sistema en su totalidad y no por partes.

Para esto se desarrolló un modelo conservando lo indispensable de la dinámica del *PMG* acoplando un rectificador en el mismo modelo, y así reducir la cantidad de elementos que al acoplar algún convertidor CD/CD, no afectara en la simulación (esto derivado de que un convertidor CD/CD trabaja a altas frecuencias, es decir, dinámica elevada).

Para tal fin se creó el modelo en LTspice que se muestra a continuación en la Figura 3.33, donde se reduce la cantidad de elementos (simplifica), para poder realizar las simulaciones con la incorporación de elementos electrónicos.

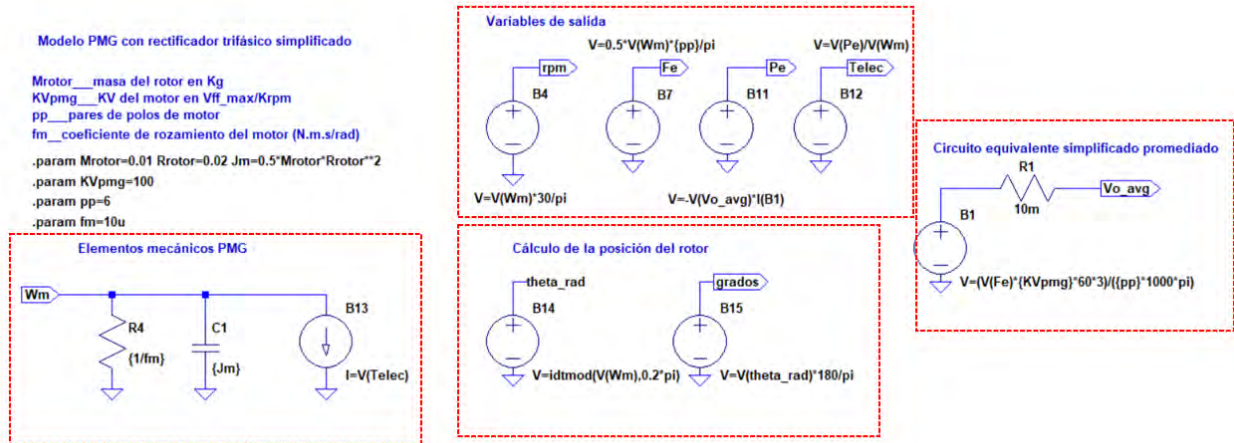


Figura 3.33 Modelo PMG con rectificador simplificado en LTspice.

Se conservan los elementos mecánicos del sistema, así como algunas variables de salida con el fin de seguir analizando algunos datos como son las revoluciones por minuto, la frecuencia, potencia y par eléctrico, y obteniendo una tensión de salida rectificadora. En la Figura 3.34 se muestra este modelo simplificado acoplado a la turbina.

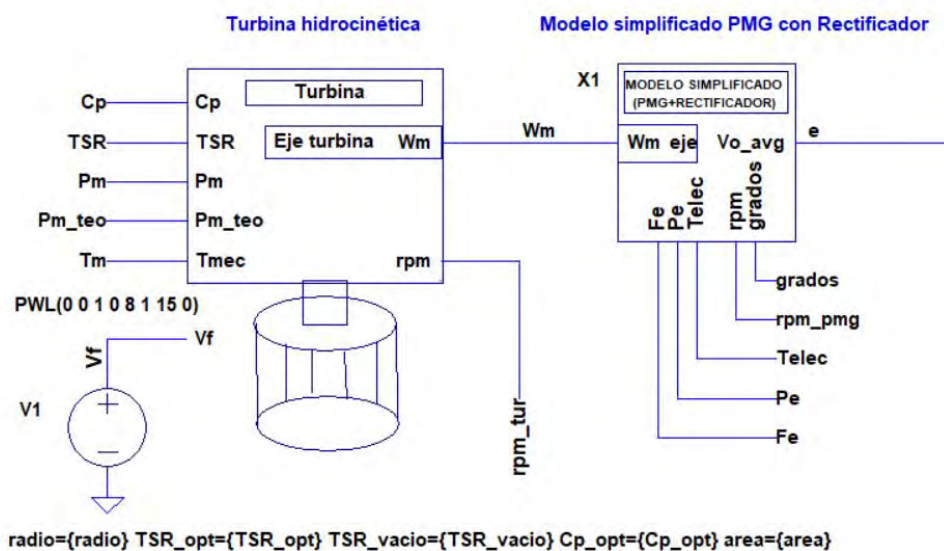


Figura 3.34 Modelo turbina con PMG y rectificador simplificado en LTspice.

3.10.2.- Selección del convertidor CD/CD

Realizado el conjunto de modelos anteriores, ahora queda uno de los elementos más importantes en la conversión de la energía, como es el convertidor CD/CD, el cual debe ser elegido con análisis y algunos criterios en el sistema al que esté destinado a ser incorporado. Básicamente este convertidor debe estar regulado en corriente de entrada, nos permitirá controlar la corriente de salida del rectificador para implementar al algoritmo *MPPT*; caso contrario al caso de no utilizar baterías, donde entonces tendríamos que regular la tensión de salida con el convertidor para mantener en una tensión regulada del bus de CD.

3.10.2.1.- Criterios importantes del convertidor

Ante el conjunto de situaciones que podrían influir en la selección del convertidor, a continuación, se muestran tres de los criterios más importantes a considerar en dicha acción, considerando que el convertidor será implementado en un sistema de cosecha de energía hidráulica utilizando microturbinas hidrocinéticas.

A.- Aislamiento

El primer criterio a considerar, es si el convertidor requiere de aislamiento, o uso de transformador, es decir, si es necesario utilizar alguna topología con aislamiento galvánico, que podría ser una topología de tipo Flyback, Medio Puente o Puente Completo (solo por mencionar algunos). Esto en relación al cumplimiento de normas o cumplir con criterios de seguridad para evitar cortos circuitos, ya que se encuentra un aislamiento entre la entrada y la salida, lo que optimiza la seguridad del sistema en esta etapa.

El uso de aislamiento también se debe considerar en caso de implementar con inversor de enlace a red (convertidor CD/CA).

B.- Topología

El carácter de la topología dependerá de algunos factores en el sistema, tales como la tensión de salida del conjunto turbina-PMG, así como de la tensión del bus de CD, o también el caso de utilizar o no batería; esto con el fin de poder nosotros seleccionar ya sea una topología reductora (Buck Converter), elevadora (Boost Converter) o reductora elevadora (Buck-Boost Converter), que quizá es la que resultaría más viable en este tipo de sistemas de cosecha de energía.

Otro punto sería considerar si se requiere de alguna topología que no presente ya sea una corriente de entrada o salida no pulsante, y por ende la carga de la batería o cosecha de energía sea bajo ciertos criterios propios de cada sistema que se desarrolle, así como del caso de utilizar algoritmo *MPPT*, seleccionar alguna que beneficie el sistema en la implementación de tal seguidor *MPPT*).

Adicionalmente se tiene que considerar la tensión del bus de CD, ya sean 12V, 24V, 48V (que ería en principio el mismo criterio de las tensiones de seguridad, como ya se mencionó en los criterios de la selección de la batería).

C.- Protecciones

Se debe considerar la implementación de protecciones en el convertidor ante algunas situaciones como que la batería está completamente cargada o tensión excesiva en el bus de corriente directa. También en caso de requerir alguna protección por flujo de agua excesivo en el sistema.

Estos criterios permiten aumentar la fiabilidad en el desarrollo de este tipo de sistemas, y principalmente en la etapa de conversión de energía donde la electrónica de potencia tiene un papel fundamental.

3.10.2.2.- Modelos simplificados convertidor CD/CD

Derivado de la lenta o rápida dinámica de los elementos mecánicos y eléctricos (como es el caso del convertidor CD/CD), se desarrollaron dos modelos simplificados de convertidores CD/CD que permiten la correcta implementación del

sistema. Esto con el objetivo de poder contar con un banco de pruebas que permita validar cada uno de los múltiples elementos del sistema y así contar con modelos apropiados para tal fin y cada caso.

Dicho de otra manera, se desarrollaron modelos a partir de circuitos equivalentes Thévenin, tanto para el caso de utilizar el convertidor como fuente conmutada (el caso de estudio donde no se utiliza batería) que se puede apreciar en la Figura 3.35, o los otros tres casos que dependiendo de la referencia de entrada será la salida, mostrado en la Figura 3.36, que permite en función de las necesidades del sistema actuar como topología promediada de un Buck, Boost, y Buck-Boost.

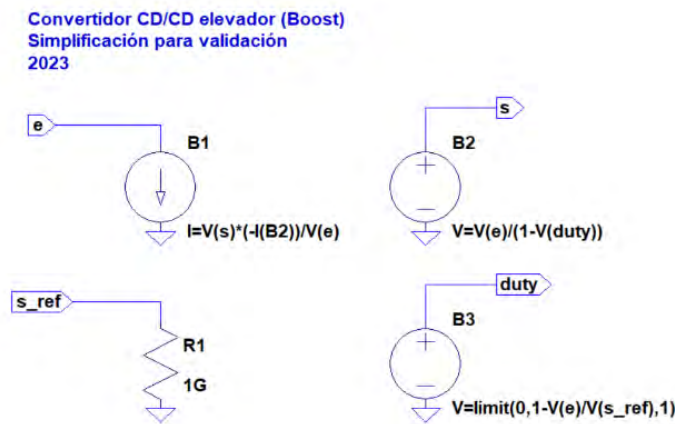


Figura 3.35 Modelo convertidor CD/CD simplificado en LTspice (caso sin batería).

MODELO CONVERTIDOR CD/CD REGULADO EN CORRIENTE DE ENTRADA

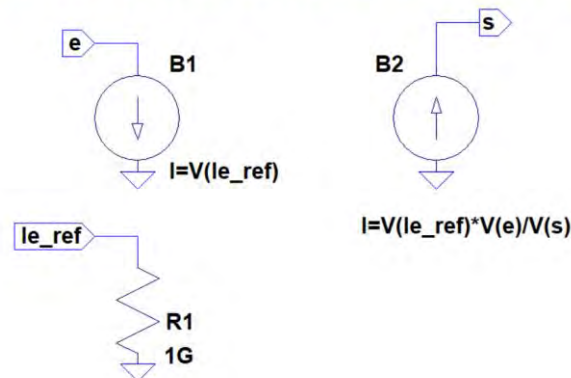


Figura 3.36 Modelo 2 convertidor CD/CD simplificado en LTspice (tres casos con batería).

Ahora se muestra un ejemplo en la Figura 3.37 de la parte externa de dichos modelos (vista como bloque en LTspice), incorporados para la simulación posterior al modelo simplificado de PMG y rectificador.

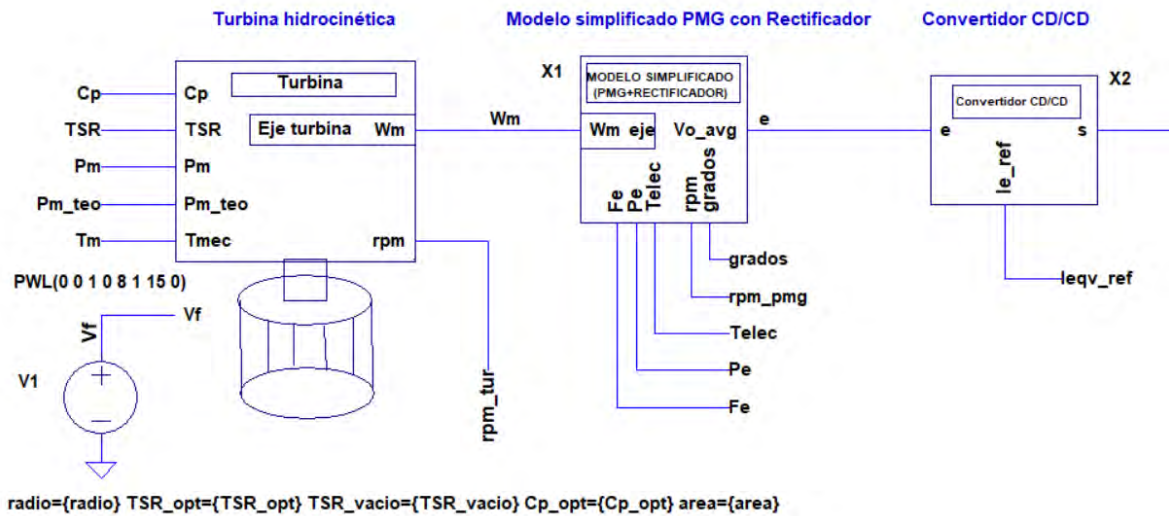


Figura 3.37 Modelo turbina, PMG, rectificador y convertidor CD/CD en LTspice.

3.10.3.- Control MPPT del convertidor

El control del convertidor también requiere de algunos esfuerzos adicionales, esto con el fin de poder siempre extraer la máxima cantidad de energía disponible en el recurso hídrico. Existen técnicas análogas en la teoría de turbina eólicas, pero algunas son demasiadas sofisticadas para la aplicación que estamos contextualizando en la presente metodología.

Primero es importante comprender que el *MPPT* se refiere a la técnica utilizada en sistemas de generación de energía, como paneles solares o turbinas eólicas, para maximizar la cantidad de energía que se extrae de la fuente de energía. El Punto de Máxima Potencia (*MPP*) es el punto operativo en él se logra extraer la mayor cantidad de energía disponible en el recurso renovable.

Dicho esto, entonces buscamos estrategias para la implementación de tal algoritmo, esto con ayuda de las virtudes del software LTspice, y razón por la cual se justifica su uso en el presente trabajo.

Para su implementación se realizó a partir de un cuasi MPPT, el cual se explica con mayor detalle en el siguiente apartado.

3.10.3.1.- MPPT en bucle abierto (cuasi-MPPT)

Los sistemas cuasi-*MPPT* pueden ser más sencillos y menos costosos que los sistemas con algoritmos *MPPT* precisos, también pueden tener un rendimiento ligeramente inferior en términos de eficiencia energética. La elección entre un enfoque cuasi-*MPPT* y uno más preciso dependerá de los requisitos específicos del sistema y de las consideraciones de costos y complejidad, por lo que, si consideramos esto, es ideal considerar un control cuasi-*MPPT*.

El término bucle abierto o "cuasi-*MPPT*" se refiere a una aproximación o enfoque que busca lograr un seguimiento cercano al Punto de Máxima Potencia (*MPPT*, por sus siglas en inglés) en un sistema de generación de energía, pero que no necesariamente implementa un algoritmo de *MPPT* puro.

Para la implementación en turbinas hidrocinéticas, se ha realizado un análisis y concluido que a partir de algunas variables como la frecuencia eléctrica, la velocidad del fluido o la velocidad de rotación del eje, podríamos nosotros implementar un algoritmo cuasi *MPPT*, sin embargo la presente metodología solo abordaría el caso de la frecuencia eléctrica ya que ya se encuentra en progreso un tesis de maestría haciendo un estudio comparativo de tales técnicas en bucle abierto y normales, por lo que se explicaría con mayor detalle y precisión cuando se realice la publicación del trabajo.

Ahora bien, si nosotros conocemos la planta y el número de polos del *PMG*, podemos calcular analíticamente entonces la corriente de referencia que podemos poner en cada momento con el fin de implementar este cuasi MPPT a partir de la medida la de la frecuencia.

La implementación del algoritmo *cuasi-MPPT* en base a la medida de la frecuencia eléctrica (f_e) es muy interesante ya que no se precisa de ningún sensor adicional.

Además, teóricamente es posible medir la frecuencia eléctrica (F_e) con mucha precisión y rapidez por medios electrónicos.

Además, teóricamente es posible medir la frecuencia eléctrica (F_e) con mucha precisión y rapidez por medios electrónicos.

Para tal caso primero es importante conocer el procedimiento (estados) a través del siguiente diagrama de la Figura 3.38, con el fin de implementar la máquina de estados en LTspice:

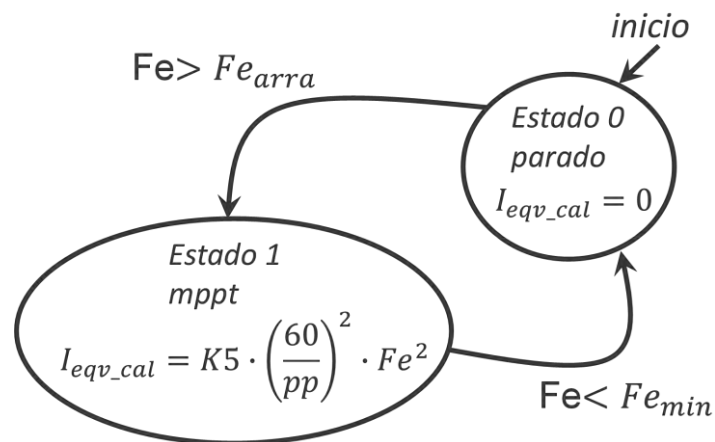


Figura 3.38 Lógica para programar la máquina de estados para el cuasi MPPT en LTspice.

Con base a esto, ahora se demuestran las ecuaciones 14 – 16, donde a partir del número de polos (pp), así como arranque de la turbina y algunas formulas generales con base a constantes como pi, el radio de la turbina y las consecuentes de conocer las rpm's, podemos entonces estimar la corriente de referencia mencionada.

$$I_{eqv_ref} = K5 \cdot \left(\frac{60}{pp}\right)^2 \cdot Fe^2 \quad (14)$$

$$Fe_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R \cdot 60} \quad (15)$$

$$Fe_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R \cdot 60} \quad (16)$$

Con esto, se muestra nuestro objetivo en la Figura 3.39 a partir de la explicación dada y ecuaciones mostradas.

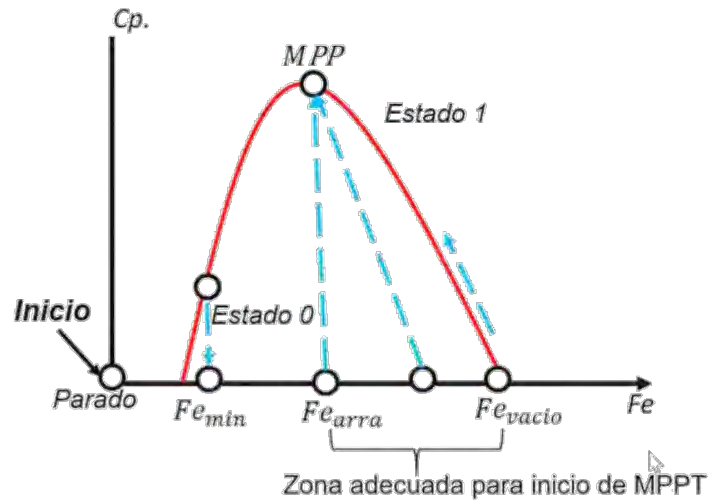


Figura 3.39 Aproximación al cuasi-MPPT a partir de la medida de la frecuencia.

Donde se aprecia que la turbina al comenzar a operar, en relación a las variables mostradas, y estimando valores por los elementos conocidos, podemos entonces acercarnos a ese punto de máxima potencia implementando el *cuasi-MPPT*. El modelo de la máquina de estados se muestra en la Figura 3.40

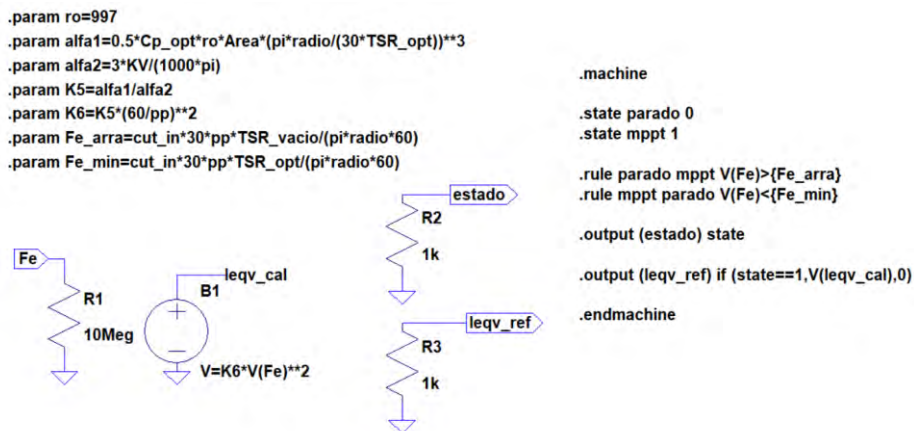


Figura 3.40 Modelo máquina de estados en LTspice para cuasi-MPPT.

Posteriormente se muestra en la Figura 3.41, el modelo en LTspice de la máquina de estados desde la parte externa del bloque, así como en la Figura 3.42 se muestra el sistema acoplado desde turbina, modelo simplificado de turbina, PMG, rectificador, convertidor CD/CD y máquina de estados para el control MPPT. Para después solo implementar en la simulación la batería que sea seleccionada.

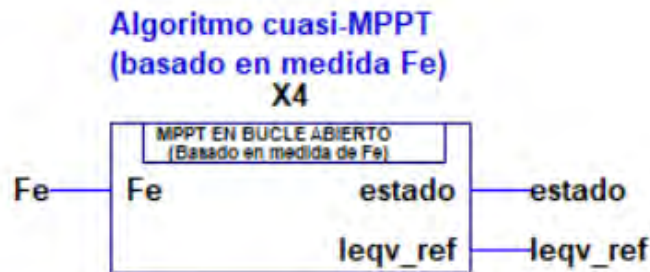


Figura 3.41 Modelo máquina de estados en LTspice para cuasi-MPPT.

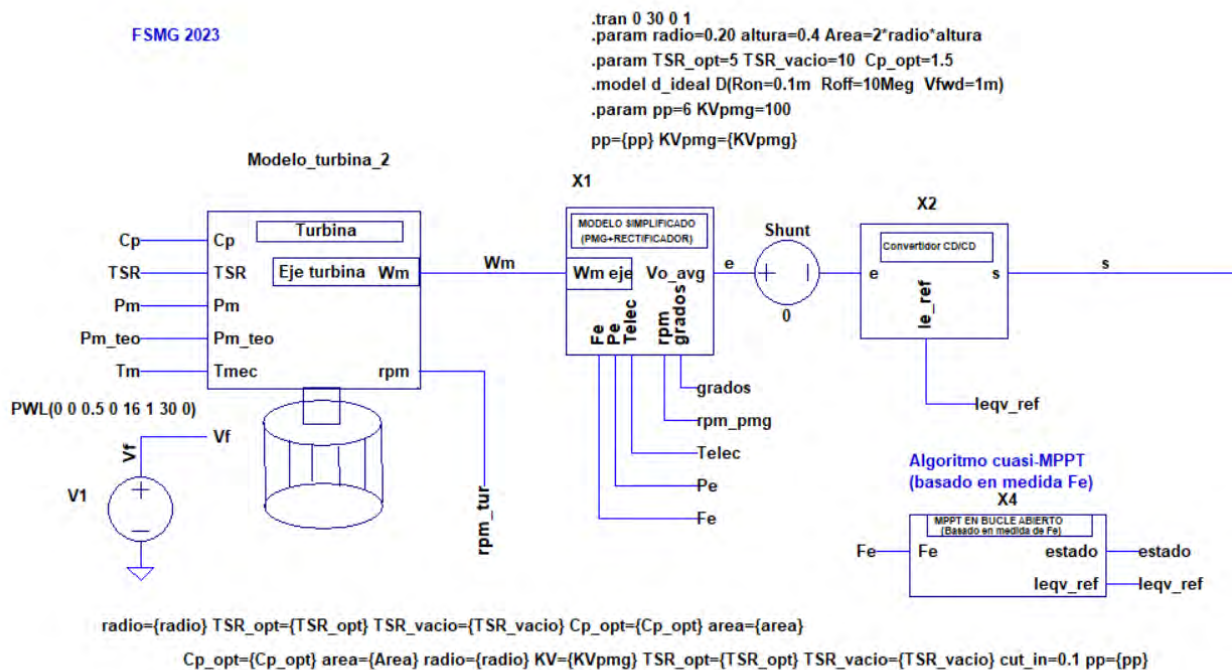


Figura 3.42 Modelo conjunto de casi todos los elementos sin batería.

3.11.- Sistema de cosecha de energía completo

Al ejecutar cada uno de los pasos, criterios, y conjunto de herramientas brindadas en la presente metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica, se realiza el acoplamiento de cada uno de los elementos ya mostrados con sus respectivos criterios de diseño, y con lo cual se logra obtener el siguiente modelo (ver Figura 3.43) en LTspice correspondiente al sistema de cosecha de energía completo.

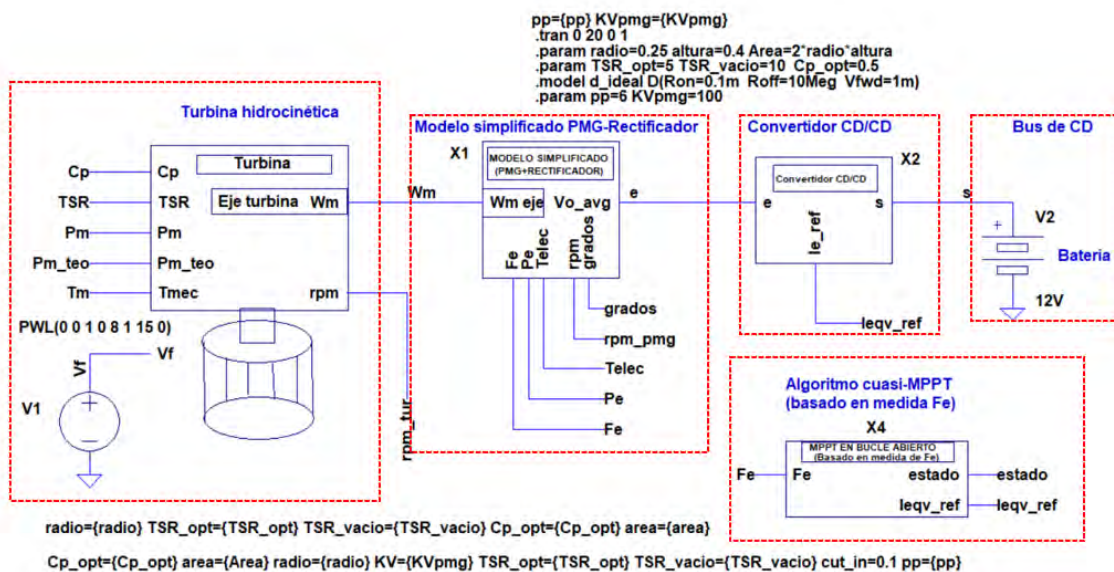


Figura 3.43 Sistema de cosecha de energía hidráulica completo.

3.12.- Conclusiones y discusión de metodología de diseño

Se ha propuesto, desarrollado y explicado una nueva metodología de diseño para sistemas de cosecha de energía hidráulica que integren turbinas hidrocínéticas como elemento de generación de energía. Al ser un campo de investigación reciente no existe en la literatura metodologías de diseño de este tipo, por lo que se considera una aportación original en los ámbitos de las energías renovables, tecnología, ingeniería y ciencia.

La presente metodología brinda diferentes criterios y pasos útiles en el desarrollo de este tipo de sistemas, que permitan como objetivo principal, electrificar viviendas

aisladas de la red, y de esta forma beneficiar diferentes sectores, no solo en la investigación, sino también en la docencia y sector industrial.

**CAPÍTULO IV
VALIDACIÓN DE
LA
METODOLOGÍA Y
RESULTADOS**

Capítulo 4. Validación de la Metodología y Resultados

4.1.- Introducción validación de metodología

Aplicada y desarrollada la metodología de diseño, en el presente capítulo del documento, se muestra la validación mediante la simulación del conjunto de elementos que conforman el sistema de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocinéticas.

Para la validación de la metodología de diseño, se utiliza el software LTspice de Analog Devices, con el fundamento de poder analizar los resultados y validar la metodología de diseño demostrando que efectivamente los criterios, y conjunto de pasos mostrados permiten el desarrollo de este tipo de sistemas.

Esta validación permitirá también evaluar los casos de estudio que fueron propuestos con la intención de que se puedan encontrar alternativas en el diseño de este tipo de sistemas de cosecha de energía, utilizando microturbinas hidrocinéticas.

Para todas las simulaciones de validación de resultados se implementó un tipo de simulación (una señal rampa del fluido) de acuerdo al espacio de instalación (río o canal de riego), esto con el fin de poder validar el funcionamiento del modelo cuasi-MPPT y el seguimiento del punto de máxima potencia.

También se colocaron diferentes medidas en las dimensiones del de la turbina y datos de la potencia teórica extraíble de acuerdo al espacio de instalación, y con la intención de verificar los casos de estudio obteniendo diferentes resultados. Se muestra una tabla por cada simulación para comprender estos elementos de entrada, así como los gráficos obtenidos en el proceso de validación.

4.2.- Caso río de bajo cauce con uso de batería

Siguiendo el orden de los casos de acuerdo a como se mostraron en el documento, tenemos entonces los siguientes gráficos y modelo en LTspice (ver Figuras 4.1 y 4.2) correspondientes al río de bajo cauce utilizando batería. En la Tabla 6, se observan los datos propuestos.

CASO: RÍO BAJO CAUCE CON BATERÍA	
ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
DATOS DE ENTRADA	
TURBINA	r= 0.25m h=0.4m
PMG	PP= 6 KVpmsg = 100
RÍO	Vel. Fluido= 0 - 1 m/s
DATOS SALIDA	
POTENCIA TURBINA + PMG	19V * 2.36A = 45W
TOPOLOGÍA CONVERTIDOR CD/CD	BUCK (REDUCTOR)
BATERÍA	TENSIÓN: 12V TECNOLOGÍA LiFePO4
MPPT	BUCLE ABIERTO (Fe)

Tabla 6: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (campo abierto) con batería.

4.2.1.- Modelo LTspice validación de caso 1

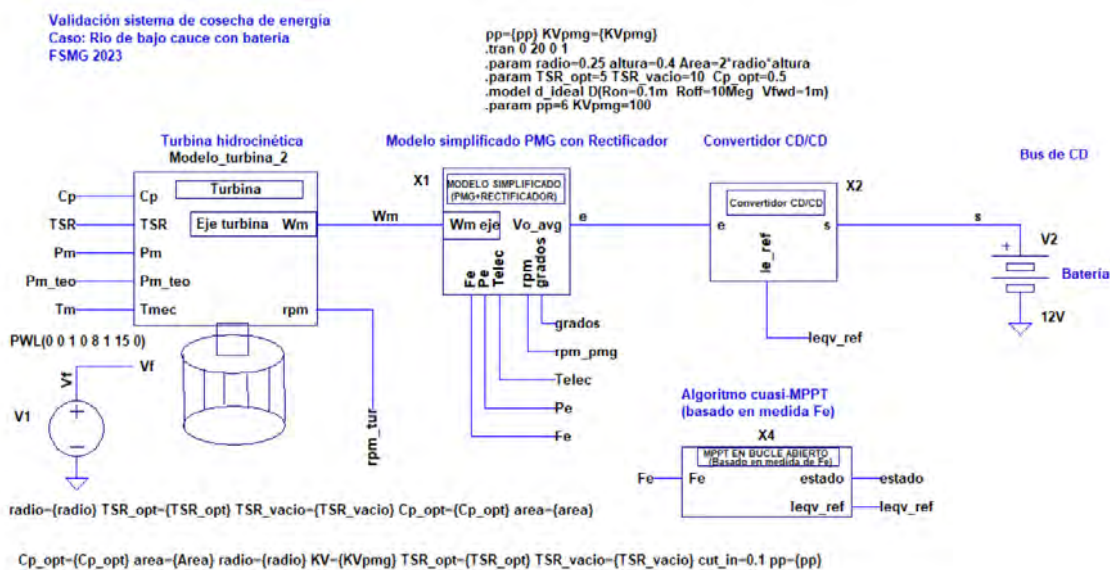


Figura 4.1 Validación LTspice campo abierto (río de bajo cauce) con batería.

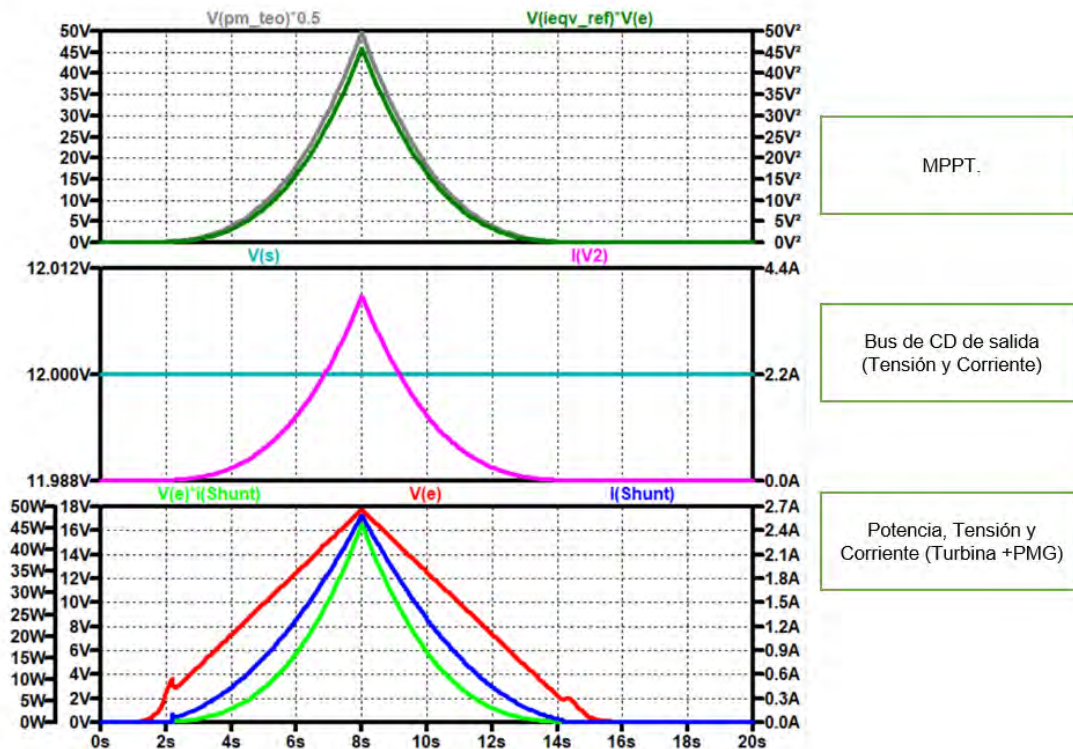


Figura 4.2 Gráficos validación LTspice campo abierto (río de bajo cauce) con batería.

Se puede observar varios puntos importantes e interesantes, en primer lugar, se logró comprobar y validar el funcionamiento del seguimiento del punto de máxima potencia en bucle abierto, en este caso un río de bajo cauce, que permite operar siempre en el *MPP*, en segundo, se pudo comprobar la tensión del bus de CD, que seleccionada la batería de 12V, favorece en el principio de ejemplificación de este caso de estudio, como los criterios para seleccionar una batería, así como el entregar un bus de CD regulado.

Por último, se pudo validar el funcionamiento del sistema, midiendo la tensión, corriente y potencia del conjunto turbina y *PMG*, lo que denota que es baja potencia y tensión dadas las condiciones planteadas en el proceso de simulación del sistema (como medidas propuestas de la turbina, número de polos y *Kv* del *PMG*, así como el uso de una batería de 12V).

4.3.- Caso canal de riego con batería

A partir de este apartado, se muestra la validación de los modelos en LTspice correspondientes a canales de riego. Cabe mencionar entonces, que se requieren utilizar las consideraciones correspondientes del capítulo 3, apartado 3.4.2.

CASO: CANAL DE RIEGO CON BATERÍA	
ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
DATOS DE ENTRADA	
TURBINA	radio= 0.20m h=0.4m
PMG	PP= 6 KVp _{pmg} = 100
CANAL DE AGUA	b= 05m he=0.60 m Vel. Fluido= 0 - 0.5 m/s
DATOS SALIDA	
POTENCIA TURBINA + PMG	36 V * 14.A = 507W
TOPOLOGÍA CONVERTIDOR CD/CD	BUCK (REDUCTOR)
BATERÍA	24V TECNOLOGÍA LiFePO4
MPPT	BUCLE ABIERTO (Fe)

Tabla 7: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) con batería.

4.3.1.- Modelo LTspice validación de caso 2

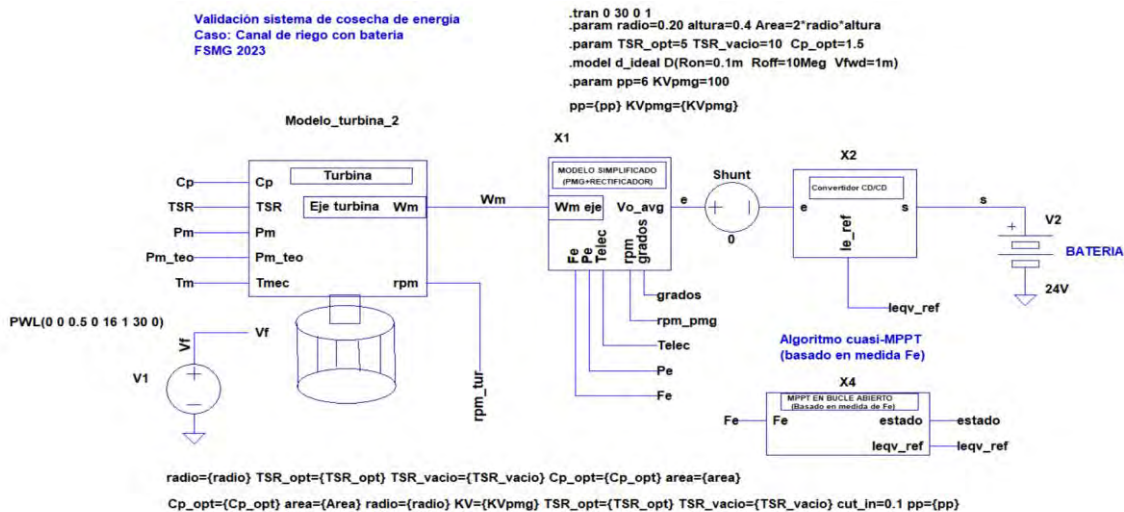


Figura 4.3 Validación LTspice canal de riego con batería.

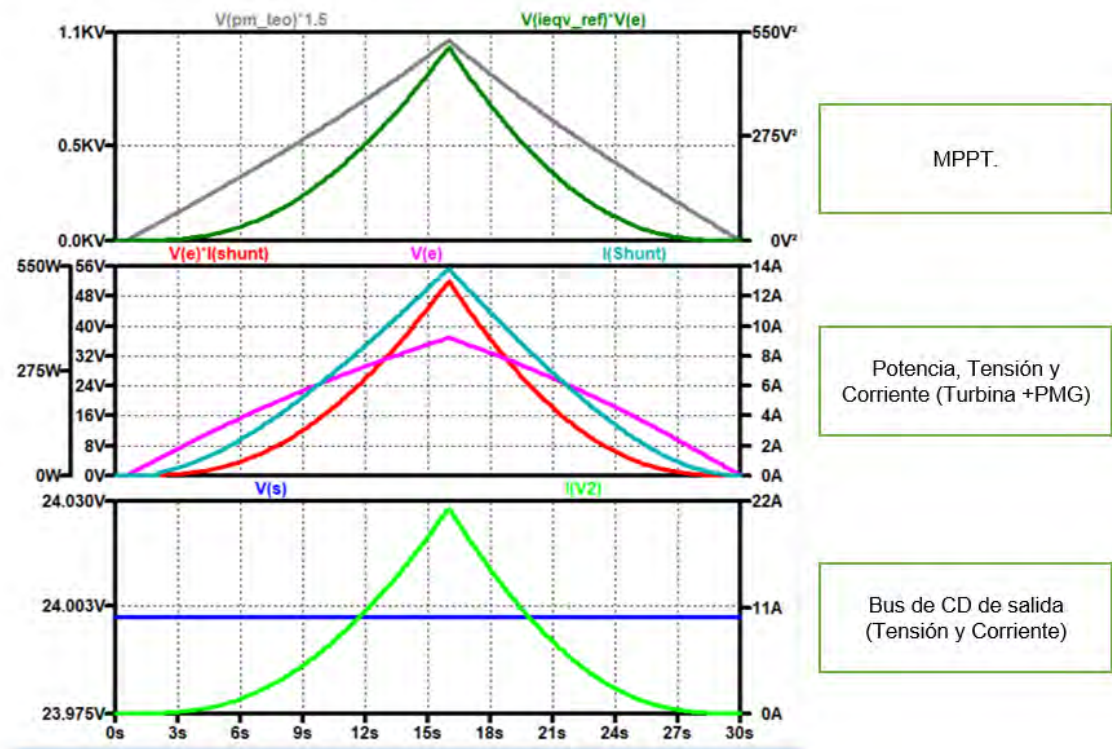


Figura 4.4 Gráficos validación LTspice canal de riego con batería.

Este primer caso utilizando las mismas dimensiones y criterios de la parte electromecánica del sistema que el caso de río de bajo cauce, a diferencia de las ecuaciones internas del bloque de la turbina, se puede ver en la Figura 4.4, que efectivamente se efectúa correctamente el seguimiento del punto de máxima potencia, así mismo, sea precia que la potencia extraíble es mayor (550W) y, por ende, permite tener una mayor autonomía por parte del sistema.

Por lo que se demuestra que en canales de riego se aprovecha mejor el recurso hídrico por las condiciones por bloqueo al instalar la turbina en un espacio semicerrado (canal de agua).

Ahora, se procede a analizar los dos casos de estudio restantes, correspondientes también a canales de riego, pero con la condición de optimizar el tamaño y no usar batería. Demostrando la amplia ventaja que presentan este tipo de sistemas de cosecha de energía.

4.4.- Caso canal de riego optimizando tamaño batería

CASO: CANAL DE RIEGO OPTIMIZANDO BATERÍA	
ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
DATOS DE ENTRADA	
TURBINA	radio= 0.25m h=0.4m
PMG	PP= 6 KVpmsg = 100
CANAL DE AGUA	b= 0.5m he=0.60 m Vel. Fluido= 0 - 0.5 m/s
DATOS SALIDA	
POTENCIA TURBINA + PMG	21.7A * 29.40 V= 637W
TOPOLOGÍA CONVERTIDOR CD/CD	BUCK (REDUCTOR)
BATERÍA	24V TECNOLOGÍA LiFePO4
MPPT	BUCLE ABIERTO (Fe)

Tabla 8: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) optimizando batería.

4.4.1.- Modelo LTspice validación de caso 3

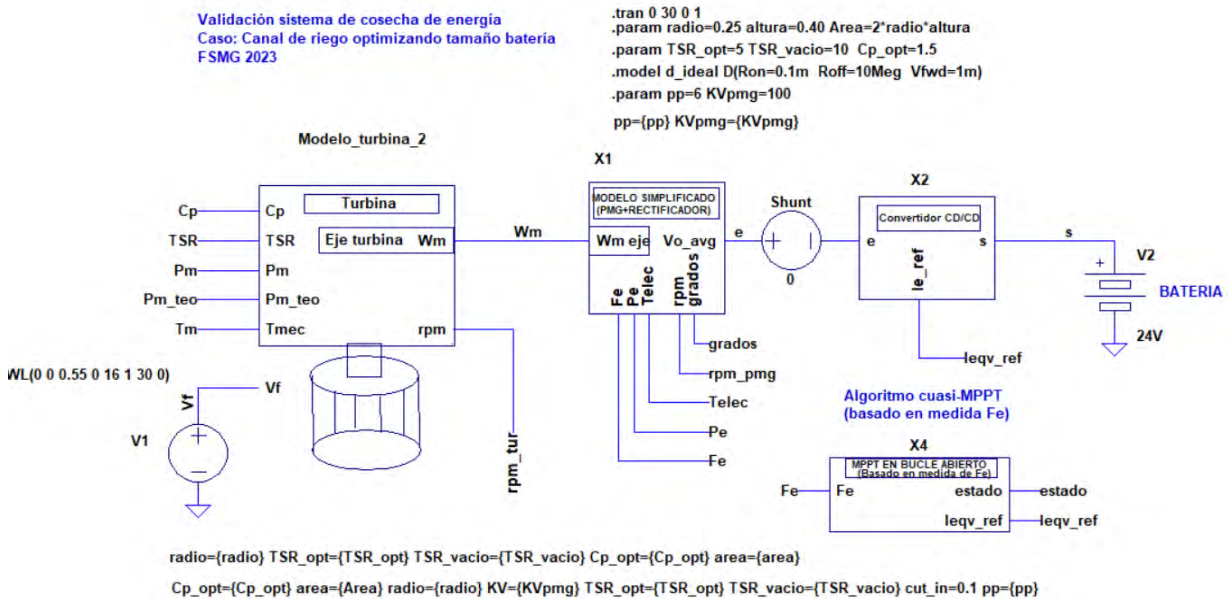


Figura 4.5 Validación LTspice canal de riego optimizando tamaño batería.

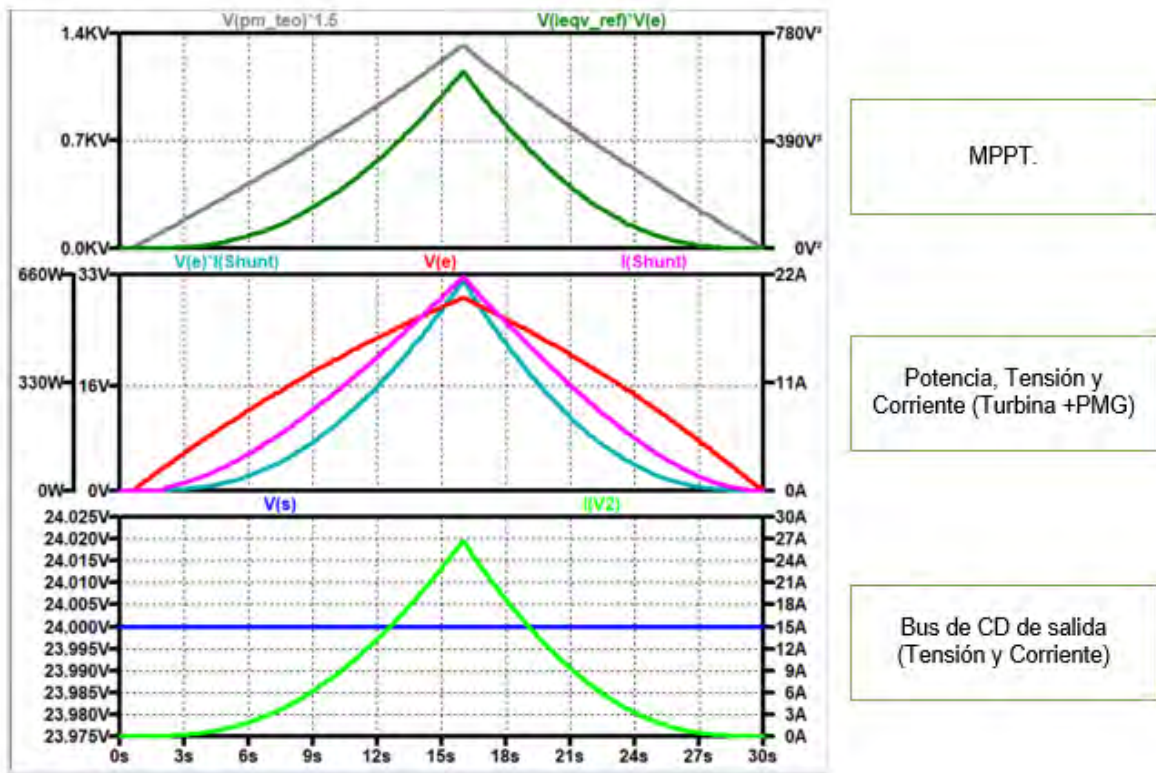


Figura 4.6 Gráficos validación LTspice canal de riego optimizando tamaño de batería.

Los comentarios son casi los mismos que los resultados del caso 4.3, a excepción de que, dada la mayor capacidad de generación del sistema (en este caso 660W), se puede utilizar batería, pero al cubrir con la demanda de la casa en los picos del perfil de consumo, podríamos utilizar una batería de menor tamaño (es decir, optimizarla), y así poder tener una alternativa más económica y útil ante las situaciones dadas (como sería un canal de mayor tamaño, una turbina más grande o flujo de agua mayor). Lo que demuestra también que en canales de agua se aprovecha de mejor forma este recurso hídrico.

Por último, se realiza la validación del caso cuatro, que sería un sistema sin el uso de batería, el cual, se ve ampliamente interesante como una opción incluso más económica de este sistema.

4.5.- Caso canal de riego sin uso de batería

CASO: CANAL DE RIEGO SIN BATERÍA	
ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
DATOS DE ENTRADA	
TURBINA	radio= 0.25m altura=0.4m
PMG	PP= 6 KVpmg = 100
CANAL DE AGUA	b= 0.6m he=0.7 m Vel. Fluido= 0 - 0.60 m/s
DATOS SALIDA	
TENSIÓN TURBINA + PMG	29.33 V * 27.55A =811W
TOPOLOGÍA CONVERTIDOR CD/CD	BOOST (ELEVADOR) Regulación tensión
MPPT	SIN MPPT (Regulación del Bus Mediante Convertidor CD/CD)

Tabla 9: Datos de entrada y salida para simulación en LTspice (canal de agua) sin batería.

4.5.1.- Modelo LTspice validación de caso 4

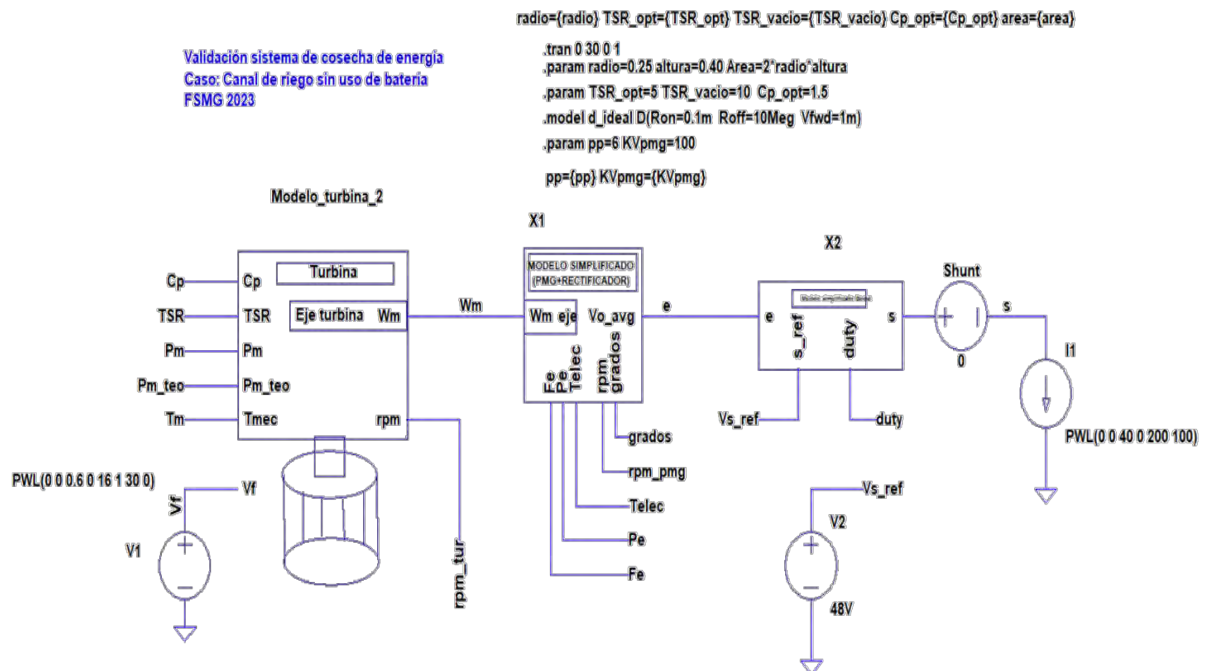


Figura 4.7 Validación LTspice canal de riego sin uso de batería.

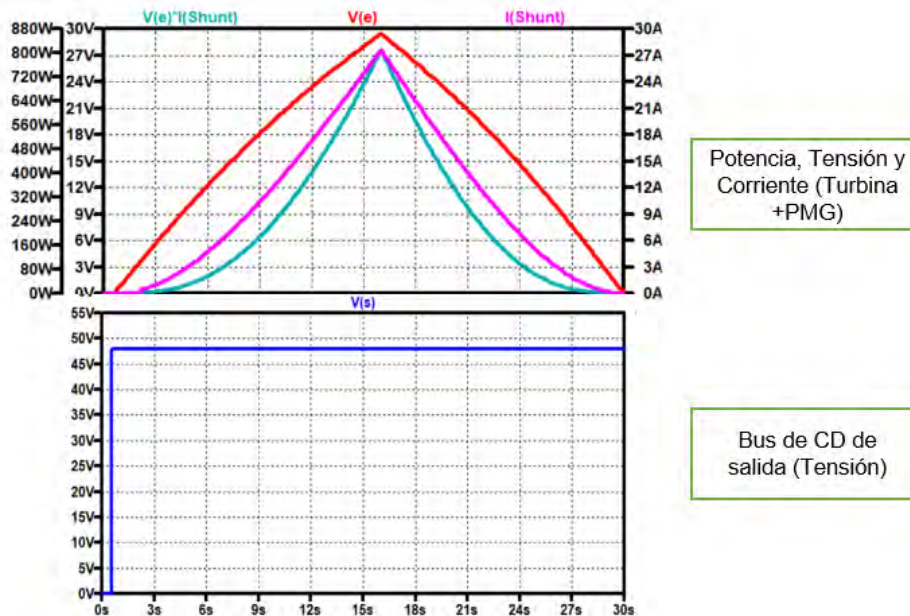


Figura 4.8 Validación LTspice canal de riego sin uso de batería.

Por último, abordando el caso de estudio de canal de riego sin uso de baterías, como pudimos ver en los ejemplos anteriores (del espacio semicerrado), notamos que se aprovecha mejor el recurso hídrico a diferencia de los ríos. Por lo que es tal el aprovechamiento, que se propuso abordar un caso de estudio donde se coloquen ya sea una turbina con gran tamaño, un canal de agua de características más propicias (mayor altura, ancho o velocidad de flujo), o igual la otra situación que serían turbinas en paralelo lo que deriva a interrogantes interesantes que este documento no abordaría).

En este sistema fue utilizada la topología de conversión CD/CD de tipo elevadora (Boost converter), con el fin de poder tener un Bus de 48 V (por seguridad, dada la potencia obtenida), este regulando tensión, y de este modo al no contar con batería, funcionando como fuente conmutada, este es otro elemento muy interesante, ya que el sistema al no tener algoritmo *MPPT* (por evidente razón al no utilizar baterías), se considera un sistema aún más económico que los primeros tres mostrados, y que en función de las necesidades, o requerimientos del usuario al

desarrollar este tipo de sistemas, permite entonces que pueda seleccionar a partir de la estimación del recurso hídrico, la opción más viable o que más le convenga.

4.7.- Comparación y discusión de resultados de validación de metodología de diseño

Al validar la metodología de diseño, se ha encontrado que efectivamente el aprovechamiento del recurso hídrico es mayor en canales de riego, así mismo se ha validado el correcto funcionamiento del sistema y su conjunto de elementos.

Se ha podido demostrar dos casos como el de optimizar tamaño de batería, así como sin el uso de la misma, que son una opción viable en caso de que en el desarrollo de un sistema lo permite, con el fin de hacerlo más económico, así como que el seguimiento del punto de máxima potencia no valdría para el caso 4 (sin uso de batería), ya que se utiliza el convertidor como fuente conmutada que regula la salida. Lo que resulta una opción accesible y económica para diferentes usuarios en el desarrollo de este tipo de sistemas de cosecha de energía.

En contraparte, los modelos validados con batería, han permitido demostrar que el algoritmo cuasi-MPPT a partir de la medida de la frecuencia efectivamente funciona correctamente, y se comprobó con los datos de entrada de la simulación mediante la rampa que simularía la fluctuación del fluido.

Esto resulta ser un ejemplo crítico, ya que, en la vida real, no tendría intermitencias que ocasionen fluctuaciones tan severas, por lo que incluso sería más preciso este algoritmo. Caso adicional, es el caso 4, donde al no utilizar baterías, resulta más económico no solo por no usar batería, sino, por el hecho de no tener que implementar un control *MPPT*, esto derivado de la gran ventaja que denota este tipo de sistemas de cosecha de energía.

4.8.- Conclusiones de validación de metodología

Los cuatro casos validados, permiten tener opciones viables y comprobables para el desarrollo de este tipo de sistemas mediante las posibilidades que podrían ocurrir a partir de los cuatro ejemplos.

El caso del río, resulta el más parecido a la teoría análoga de turbinas eólicas, sin embargo, los otros tres, se pueden considerar una aportación de este trabajo, ya que no existe en la literatura modelos de turbinas en simuladores que utilicen el C_p como se hizo en este trabajo a partir de las ecuaciones de canales de riego.

Cada caso fue diferente en cuanto a la potencia que se podría extraer, derivado de los ejemplos mostrados, se puede validar que la metodología brinda herramientas para que el sistema opere en términos óptimos tanto de funcionamiento general como de seguridad, ya que se utilizaron baterías para los ejemplos con cierta tensión que fuera segura para el usuario.

Por otra parte, el software LTspice, resultó una herramienta poderosa y con buen desempeño en el proceso de validación, incluso con recursos de sobra que demuestran que aún quedan muchas cosas por hacer con este software.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Capítulo 5. Conclusiones

Después de la realización del presente trabajo, se pudo concluir en términos generales que se tiene una clara tendencia positiva para utilizar de manera alternativa la energía hidráulica y en particular las turbinas hidrocinéticas como opción de bajo costo y de mayor confiabilidad para electrificar comunidades rurales, al no presentar el problema de intermitencia como otras energías renovables, permitiendo esta condición el reducir los requerimientos de almacenamiento de energía. Las conclusiones puntuales del proyecto son las siguientes:

- Se demostró teóricamente y con el apoyo de una simulación en LTspice, la validez de la metodología sistemática para el diseño de este tipo particular de sistemas hidráulicos que fue desarrollada en esta tesis, la cual permite ahorros substanciales en los tiempos de desarrollo de proyectos de electrificación de casas rurales a través de turbinas hidrocinéticas en canales de riego y ríos de bajo cauce.
- El recurso hídrico es mejor aprovechado en los espacios semicerrados (canales de riego) donde por las propiedades del espacio (condiciones por bloqueo) se puede llegar a extraer mayor potencia de la altura y el límite de Betz no aplica.
- Para el caso canales de agua y análisis de los límites intrínsecos de estas condiciones de operación, es necesario hacer otro planteamiento para el coeficiente de potencia (C_{px}), el cual fue desarrollado en el apartado 3.4.2.1
- Existe una ventaja natural de los sistemas de cosecha de energía hidráulica frente a otros como los sistemas solares o eólicos por la no intermitencia en la generación (salvo situaciones específicas críticas), al no depender, por ejemplo, de la irradiancia solar o velocidad del viento que muchas veces no son constantes.

- Existen ventajas económicas en este tipo de proyectos por el hecho de poder reducir (optimizar) el tamaño de la batería, o incluso omitir su uso por la capacidad y constancia de generación y de la misma (es decir, al no presentar intermitencias).
- El desarrollo de este tipo de sistemas trae consigo beneficios para el gobierno federal ante sus principales metas en este ámbito de la proliferación del uso de energías limpias, así como el tema de la soberanía energética en comunidades rurales.

5.1.- Aportaciones

- Se desarrolló una original metodología de diseño para el desarrollo de este tipo de sistemas de cosecha de energía.
- Es importante destacar, que más allá de la validación con el software LTspice, esta herramienta se utilizó para el desarrollo de modelos utilizando similares eléctricos y partiendo de ecuaciones de funcionamiento de turbinas, *PMG*, así como de elementos de electrónica de potencia del sistema planteado; lo que permite modelar con precisión diferentes partes del sistema (de forma individual o en conjunto).
- Creación de modelos en LTspice que permitan simular el sistema utilizando un coeficiente de potencia en canales de agua (Cpx), como se explicó en el apartado 3.4.2.1.
- Versatilidad de la metodología para validar previamente la instalación de este tipo de sistemas (ante diferentes criterios como los cuatro casos de estudio que se abordaron), lo que impacta positivamente en la economía del usuario al contar con una metodología, así como los medios necesarios para validar el sistema previo a la implementación.

5.2.- Trabajos futuros

La búsqueda de nuevas estrategias para el uso de energías renovables es una tendencia a nivel mundial, lo que genera nuevos retos en los campos de investigación, ciencia y tecnología. Después de abordar diferentes temas (al realizar la metodología que abarca diferentes ámbitos de acuerdo a cada elemento del sistema) el presente trabajo deriva a múltiples trabajos interesantes, en los que la metodología desarrollada en este trabajo de tesis, juega un papel muy importante. Algunos de estos posibles trabajos futuros serían:

- La búsqueda de estrategias para el monitoreo, operación, mantenimiento y diagnóstico de fallas de este tipo de sistemas mediante el uso de IoT, que permitan detectar problemas en las turbinas hidrocinéticas (como atascamiento o rotura de palas, por ejemplo) de forma indirecta, que permitan el adecuado funcionamiento y monitoreo remoto de estos sistemas de cosecha de energía hidráulica).
- Mejoras o propuestas de diseños mecánicos de la turbina, así como estudio de los materiales de diseño más óptimos. Esto permitiría también hacer pruebas experimentales y evaluar las pérdidas del sistema según el tipo de aplicación y eficiencia.
- Mejoras en el diseño del *PMG* para este tipo de aplicaciones específicas, como aumentar el número de polos, mejorar la *Kv*, entre otros.
- Análisis sobre la estructura del sistema electrónico de potencia, o posibles ideas de microrredes con varias microturbinas hidrocinéticas (o utilizando otros sistemas de cosecha de energía en conjunto, como la solar o eólica) para implementar sistemas de mayor potencia y confiabilidad.
- Estudio comparativo de técnicas para el seguimiento del punto de máxima potencia, para este tipo de fuente primaria de energía (esta investigación ya está siendo realizada en una tesis de maestría en el TecNM CENIDET, donde se buscan encontrar las técnicas de *MPPT*, más eficientes y económicas de

acuerdo a cierta aplicación de este tipo de sistemas, pero queda abierta la posibilidad de encontrar nuevas estrategias).

Por último, ante el conjunto de trabajos futuros mencionados que se pueden abordar, así como de la estancia de investigación en España (derivada también de este tema de tesis de maestría), se busca iniciar una tesis doctoral, donde se abordaría parte de este tipo de temas mencionados, que se consideran muy interesantes y con amplio margen de aportación, aplicabilidad y complejidad, ya que no hay suficiente o en algunos casos es incluso nula la información en la literatura actual.

5.3.- Productos académicos

La presente tesis de maestría, presentó diferentes productos académicos en el proceso de desarrollo de la misma, tanto en beneficio de la propia tesis, así como de las metas por parte del CONAHCYT, con actividades de retribución social, las cuales son:

- Curso intersemestral del software LTspice impartido a alumnos de maestría en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Participación en el 2do Congreso Nacional del Verano de Investigación en Ciencia y Tecnología del Tecnológico Nacional de México 2023, donde se capacitó y co-asesoró a dos alumnos del Instituto Tecnológico de Los Mochis, Sinaloa, para validar la metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía desarrollada en esta tesis, para aplicarse en dos casos reales de dicha localidad en canales de riego.
- Estancia de investigación en la Universidad de Oviedo, España; específicamente con los grupos de Investigación de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) y el grupo CE3I2, de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI-Gijón), donde se trabajó en proyectos puestos en marcha en torno a turbinas hidrocínéticas, así como redacción y publicación de artículos en congresos locales y revistas de alto factor de impacto (que están siendo sometidos a los foros correspondientes).

- Ponencia del artículo titulado: “Hydraulic Energy Harvesting Systems with Hydrokinetic Microturbines, an Alternative of Energy Generation for Electrification of Rural Houses”, en el 1er **Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada** (CITCA) 2023, así mismo un artículo más en proceso de revisión para su posterior publicación en la revista: ***International Journal of Electrical Power & Energy Systems***.

Referencias

- [1] L. Dormido, I. Garrido, P. L'hotellerie-Fallois, y J. Santillán, "El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas. *Documentos Ocasionales* N.º 2213."
- [2] N. Morales, J. I. Navarrete, y O. De Buen, "Servicios energéticos, pobreza energética y eficiencia energética: una perspectiva desde México", 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.cienciasambientales.org.es/index.php/iques-es-la-pobreza-energetica>
- [3] J. A. Ramos Aguilar y Z. S. Hernández Veleros, "Impacto Económico y Ambiental de las Energías Renovables y No Renovables en México", *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, vol. 11, núm. 22, pp. 17–27, jun. 2023, doi: 10.29057/icea.v11i22.10997.
- [4] E. Alvarez Alvarez, M. Rico-Secades, E. L. Corominas, N. Huerta-Medina, y J. Soler Guitart, "Design and control strategies for a modular hydroKinetic smart grid", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 137–145, feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.08.019.
- [5] F. S. Macedo, I. Hernández-Orozco, J. Arau, y M. Rico-Secades, "Hydraulic Energy Harvesting Systems With Hydrokinetic Microturbines, an Alternative of Energy Generation for Electrification of Rural Houses", *1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada*, Cuernavaca, Morelos, México, nov. 2023.
- [6] H. J. Vermaak, K. Kusakana, y S. P. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 625–633, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.066.
- [7] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, y J. E. Quicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review", *Applied Energy*, vol. 86, núm. 10. Elsevier Ltd, pp. 1823–1835, 2009. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017.
- [8] R. Espina-Valdés, A. Fernández-Jiménez, V. M. Fernández-Pacheco, A. Gharib-Yosry, y E. Álvarez-Álvarez, "Análisis experimental de la influencia del ángulo de torsión de los álabes de turbinas hidrocínicas Darrieus helicoidales", *Ingeniería del Agua*, vol. 26, núm. 3, pp. 205–216, jul. 2022, doi: 10.4995/ia.2022.17696.

- [9] M. I. Yuce y A. Muratoglu, “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Elsevier Ltd, pp. 72–82, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.037.
- [10] L. García, A. Fernández, N. Rodríguez, E. Álvarez, A. Meana, y J. Fernández, “Caracterización de microturbina hidrocínética mediante modelo numérico de dinámica de fluidos computacional”, A. Coruña, España, oct. 2017.
- [11] Beeby Stephen y White Neil, “Energy Harvesting for Autonomous Systems”, 2010.
- [12] W. E. Guastay, “El uso de la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica como estrategia para el desarrollo”, 2020.
- [13] F. Posso, “Estudio del desarrollo de las energías alternativas en Venezuela”, 2004.
- [14] P. Brun, L. Terme, y A. Barillier, “Paimpol-Bréhat: Development of the First Tidal Array in France”, en *Marine Renewable Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 279–310. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118603185.ch9>.
- [15] B. Kirke, “Hydrokinetic and ultra-low head turbines in rivers: A reality check”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 52, pp. 1–10, oct. 2019, doi: 10.1016/j.esd.2019.06.002.
- [16] M. S. Güney y K. Kaygusuz, “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, núm. 9. Elsevier Ltd, 2010. doi: 10.1016/j.rser.2010.06.016.
- [17] J. N. Goundar y M. R. Ahmed, “Marine current energy resource assessment and design of a marine current turbine for Fiji”, *Renew Energy*, vol. 65, pp. 14–22, may 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.06.036.
- [18] S. H. Agudelo, “Modelado numérico de una turbina para la extracción de energía por medio de corrientes marinas”, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, UNAM, Ciudad de México, 2021.
- [19] L. I. Lago, F. L. Ponta, y L. Chen, “Advances and trends in hydrokinetic turbine systems”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, núm. 4. Elsevier B.V., pp. 287–296, 2010. doi: 10.1016/j.esd.2010.09.004.
- [20] P. Bachant y M. Wosnik, “Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency”, *Renew Energy*, vol. 74, pp. 318–325, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.07.049.

- [21] M. Pinilla y S. Martínez, “Optimal design of permanent-magnet direct-drive generator for wind energy considering the cost uncertainty in raw materials”, *Renew Energy*, vol. 41, pp. 267–276, may 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.11.005.
- [22] H. Li, Z. Chen, y H. Polinder, “Optimization of multibrid permanent-magnet wind generator systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, núm. 1, pp. 82–92, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2005279.
- [23] M. K. Kazimierczuk, “Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters”, Dayton, Ohio, USA, 2008.
- [24] M. G. Molina, “Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, núm. 11, pp. 2191–2219, nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2702627.
- [25] J. Rosero García, R. García Sierra, A. F. Cerón, y A. F. Zuñiga, “Una propuesta metodológica para la evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) utilizando KPIs”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 40, núm. 02, pp. 204–223, dic. 2022, doi: 10.14482/inde.40.02.627.001.
- [26] V. A. Shah, A. Jivanadhar, R. Maheshwari, y R. Roy, “Review of Ultracapacitor Technology and its Applications”, *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, 2008.
- [27] C. O. Uguña, L. G. Morales, y N. A. Sousa, “Control of a System of Energy based on Flywheel to mitigate the Voltage Gaps at the Point of Common Coupling”, *Ingenius*, vol. 2020, núm. 24, pp. 49–58, jul. 2020, doi: 10.17163/ings.n24.2020.05.
- [28] L. Contreras, D. Coello, y L. Escobar, “Almacenamiento de Energía en forma de Hidrógeno en Hidruro de Magnesio MgH₂”, *NovasinerGía Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, vol. 3, núm. 2, pp. 80–92, dic. 2020, doi: 10.37135/ns.01.06.07.
- [29] IRENA, *Innovative operation of pumped hydropower storage innovation landscape brief*. 2020. [En línea]. Disponible en: www.irena.org
- [30] H. Acevedo Meza, J. L. Mendoza García, y S. Sepúlveda Mora, “Estrategias de control MPPT aplicadas en un convertidor DC/DC tipo Boost para sistemas fotovoltaicos”, *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (RCTA)*, vol. 2, núm. 30, abr. 2018, doi: 10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751.
- [31] T. Pollan Santamaría, “Simuladores eléctricos SPICE”, *Documentos académicos*, Universidad de Zaragoza, España, 2020.

- [32] P. K. Talukdar *et al.*, “IN-SITU EXPERIMENTS TO ESTIMATE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A DOUBLE-STEP HELICAL-BLADED HYDROKINETIC TURBINE”, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [33] A. Meana-Fernández, J. Fernández Oro, K. Argüelles Díaz, y S. Velarde-Suárez, “Turbulence-Model Comparison for Aerodynamic-Performance Prediction of a Typical Vertical-Axis Wind-Turbine Airfoil”, *Energies (Basel)*, vol. 12, núm. 3, p. 488, feb. 2019, doi: 10.3390/en12030488.
- [34] A. Meana-Fernández *et al.*, “Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocínética”, *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, oct. 2017.
- [35] H. A. Rolón Ortiz, C. Acevedo Peñaloza, y Y. Villamizar González, “Modelado matemático y simulación del comportamiento de una turbina hidrocínética tipo darrieus; consideraciones de diseño.”, *Respuestas*, vol. 23, núm. S1, pp. 14–18, jul. 2018, doi: 10.22463/0122820x.1492.
- [36] A. Fernández-Jiménez, E. Blanco-Marigorta, A. Gharib-Yosry, V. M. Fernández-Pacheco, y E. Álvarez-Álvarez, “Evaluation of a vertical axis hydrokinetic turbine for water channels”, *Dyna (Spain)*, vol. 96, núm. 2, pp. 194–199, mar. 2021, doi: 10.6036/9883.
- [37] V. Peña-García, “Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos”, Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Mecánico Eléctrica, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2013.
- [38] J. S. Zambrano López, “Comparativo de la factibilidad de una solución aislada que utiliza energía solar o hidrocínética”, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2021.
- [39] L. N. Mbele, K. Kusakana, y S. P. Koko, “Simulations and experimental validation of Pico conduit pressure hydropower systems with battery storage”, *J Energy Storage*, vol. 26, dic. 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100976.
- [40] D. Fernández Suárez, E. Álvarez Álvarez, A. J. Gutiérrez-Trashorras, y J. Fernández Francos, “Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del río Nalón (Asturias, España) mediante simulación de flujo unidimensional”, *Ingeniería del agua*, vol. 19, núm. 1, p. 31, ene. 2015, doi: 10.4995/ia.2015.3260.
- [41] L. G. Cortes y J. E. Montañez, “Metodologías de diseño para el suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas a partir de energías renovables”, Tesis de ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/>

- [42] C. Gonçalves, O. Possamai, y A. B. Pinho Junior, “Metodologías para a implantação de turbinas hidrocínéticas na amazônia”, 2009.
- [43] V. Patel, T. I. Eldho, y S. V. Prabhu, “Velocity and performance correction methodology for hydrokinetic turbines experimented with different geometry of the channel”, *Renew Energy*, vol. 131, pp. 1300–1317, feb. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.027.
- [44] F. Romero-Menco, A. Rubio-Clemente, y E. Chica, “Turbinas hidrocínéticas tipo propela: una alternativa para la generación de energía eléctrica”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, núm. 3, sep. 2022, doi: 10.18273/revuin.v21n3-2022010.
- [45] R. Aubrée, “Thèse de Doctorat Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l’énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance.”, Francia , 2014.
- [46] INEGI, “Primera Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)”, nov. 2018.
- [47] SENER, CONUEE, y INEGI, “Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares ENCEVI”, 2018. [En línea]. Disponible en:
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_spanish.pdf
- [48] Palacios A., Peña N., Cervantes E., Güitrón A., y López M., “Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica CEMIE-Hidro. 2da Parte: Posibilidades de Desarrollo Hidroeléctrico en México”, Jiutepec, Morelos, 2017.
- [49] M. L. Villarrubia, “Ingeniería de la Energía Eólica”, Barcelona, España, may 2012.
- [50] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas, 5ta Edición*, 5a ed. D.F., México, 2012.
- [51] “IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems”, *IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage*, 2019.
- [52] M. Barghamadi, A. Kapoor, y C. Wen, “A Review on Li-S Batteries as a High Efficiency Rechargeable Lithium Battery”, *J Electrochem Soc*, vol. 160, núm. 8, pp. A1256–A1263, 2013, doi: 10.1149/2.096308jes.
- [53] M. G. Molina, “Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid”, *Proceedings*

of the IEEE, vol. 105, núm. 11, pp. 2191–2219, nov. 2017, doi:
10.1109/JPROC.2017.2702627.

ANEXO A. Script en Python con librerías numpy y matplotlib para generar gráficos a partir de las ecuaciones teóricas, proponiendo datos de una turbina.

```
1 """
2 Caracterización de turbina Tesis Ing.Fher Macedo
3 Simulación 2
4 """
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 #Datos turbina
8 radio= 0.15 #dimensiones en metros
9 altura= 0.30
10 Area = altura*(2*radio)
11 Da = 997 #Densidad del agua (Kg/m3)
12 Cp_opt=0.5 #Rendimiento
13 #
14 agua = np.arange(0, 2, 0.1) #ajustamos parámetros gráfica
15 #Calculamos potencia teórica y el
16 # en el punto de maxima potencia(mpp)
17 Pteo = 0.5*Da*Area*agua**3
18 Pmpp = Cp_opt*Pteo #potencia util
19 #Graficamos
20 plt.plot(agua, Pteo,color='blue',linewidth='3')
21 plt.plot(agua, Pmpp,color='red',linewidth='3')
22 #
23 plt.xlabel('Agua [m/s]')
24 plt.ylabel('Potencia [W]')
25 plt.title('Potencia que se obtiene del agua')
26 plt.legend(['Pteorica', 'Pmpp'])
27 plt.show()
```

ANEXO B. Script en Python con librerías numpy y matplotlib para generar gráficos a partir de las ecuaciones teóricas, realizando el ajuste hidrodinámico de la turbina para el punto de máxima potencia.

```
1 """
2 Caracterización de turbina Tesis Ing.Fher Macedo
3 Simulación 3
4 """
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 #Datos turbina
9 Cp_opt=0.5 #Rendimiento
10 TSR_opt = 4 #TSR en el punto de rendimiento máximo
11 TSR_vacio = 1.7*TSR_opt #TSR en vacío
12 #
13 #Constantes K1 Y K2
14 K2=TSR_vacio*TSR_opt/(TSR_vacio-TSR_opt)
15 K1=Cp_opt/(((TSR_vacio/TSR_opt)-1)*np.e**(-K2/(TSR_opt)))
16 #
17 TSR = np.arange(0.1, 8, 0.01)
18 #
19 Cp = K1*((TSR_vacio/TSR)-1)*np.e**(-K2/TSR)
20 #Se elimina la parte negativa de la curva
21 np.putmask(Cp,Cp<0,0)
22 #Graficamos
23 plt.plot(TSR, Cp,color='black',linewidth='3')
24 plt.axvline(x=TSR_opt,ymin=0,ymax=1,linewidth='1',linestyle='--',color='red')
25 plt.axvline(x=TSR_vacio,ymin=0,ymax=1,linewidth='1',linestyle='--',color='blue')
26 plt.axhline(y=Cp_opt,xmin=0,xmax=1,linewidth='1',linestyle='--',color='green')
27 #
28 (plt.text(0,0.4,"TSR_opt="+str("{0:.1f}".format(TSR_opt))+
29 ' p.u. ', size=8, color='red'))
30 #
31 (plt.text(0,0.35,"TSR_vacio="+str("{0:.1f}".format(TSR_vacio))+
32 ' p.u. ', size=8, color='blue'))
33 #
34 (plt.text(0,0.3,"Cp_opt="+str("{0:.1f}".format(Cp_opt))+
35 ' p.u. ', size=8, color='green'))
36 #
37 plt.xlabel('TSR [p.u.]')
38 plt.ylabel('Cp [p.u.]')
39 plt.title('Coeficiente de potencia (Cp)')
40 plt.legend(['Cp'])
41 plt.show()
```

ANEXO C. Análisis de potencia extraíble en canales de agua a partir de medidas dadas y por ecuaciones teóricas del mismo con un ejemplo.

ESTUDIO DE UNA TURBINA EN CANAL CONSIDERANDO CONDICIONES DE BLOQUEO

b es el ancho del canal (Canal en México: ancho: 0.5 m y altura: 0.6 m)

he, hs son las alturas del agua de entrada y de salida respectivamente, ro es la densidad del agua, g es la gravedad.

DATOS DE ENTRADA

b := 0.50 m Presión atmosférica en

ro := 997 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Pascales

Patm := 101325 Pa ←

g := 9.81 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

POTENCIA A LA ENTRADA

he1 := 0.60 m

Ae (he) := b · he

caudal (Ve, he) := Ae (he) · Ve

Pot_e_presion (Ve, he) := Patm · Ae (he) · Ve

Pot_e_cinetica (Ve, he) := $\frac{1}{2} \cdot ro \cdot Ae (he) \cdot Ve^3$

Pot_e_altura (Ve, he) := ro · g · he · Ae (he) · Ve

Pot_e_total (Ve, he) := Pot_e_presion (Ve, he) + Pot_e_cinetica (Ve, he) + Pot_e_altura (Ve, he)

Ve1 := 0.4 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

caudal (Ve1, he1) = $(120 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ +

Pot_e_presion (Ve1, he1) = $(12.159 \cdot 10^3)$ W

Pot_e_cinetica (Ve1, he1) = 9.571 W

Pot_e_altura (Ve1, he1) = 704.201 W

Pot_e_total (Ve1, he1) = $(12.873 \cdot 10^3)$ W

POTENCIA DESPUES DE LA TURBINA

Vs := Ve1, Ve1 + 0.1 .. 2

hs (Vs, Ve, he) := he · $\frac{Vs}{Ve}$

As (Vs, Ve, he) := hs (Vs, Ve, he) · b

Pot_s_presion (Vs, Ve, he) := Patm · As (Vs, Ve, he) · Vs

Pot_s_cinetica (Vs, Ve, he) := $\frac{1}{2} \cdot ro \cdot As (Vs, Ve, he) \cdot Vs^3$

Pot_s_altura (Vs, Ve, he) := ro · g · hs (Vs, Ve, he) · As (Vs, Ve, he) · Vs

Pot_s_total (Vs, Ve, he) := Pot_s_presion (Vs, Ve, he) + Pot_s_cinetica (Vs, Ve, he) + Pot_s_altura (Vs, Ve, he)

Vs_opt (Ve, he) := $(g \cdot he \cdot Ve)^{\frac{1}{3}}$

Pot_s_cinetica (Vs_opt (Ve1, he1), Ve1, he1) = 105.868

Pot_s_altura (Vs_opt (Ve1, he1), Ve1, he1) = 211.737

Pot_s_total (Vs_opt (Ve1, he1), Ve1, he1) = $12.477 \cdot 10^3$

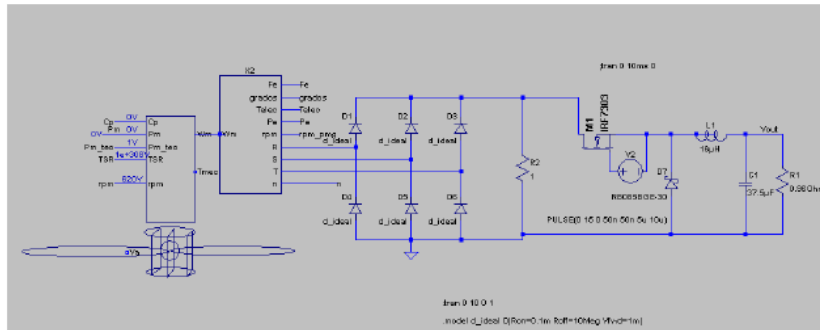
Pot_ex (Vs_opt (Ve1, he1), Ve1, he1) = 396.167

ANEXO D. Validación Metodología - Verano de Investigación en Ciencia y Tecnología TecNM 2023.

- Marycruz Salas Perea (Validación canal de riego sin uso de batería)

El canal seleccionado es de tipo de sección trapezoidal y cuenta con las siguientes dimensiones y características:

Velocidad de flujo: 0.52 m³/seg
 Base Mayor: 2 m
 Base Menor: 1 m
 Altura: 0.6 m



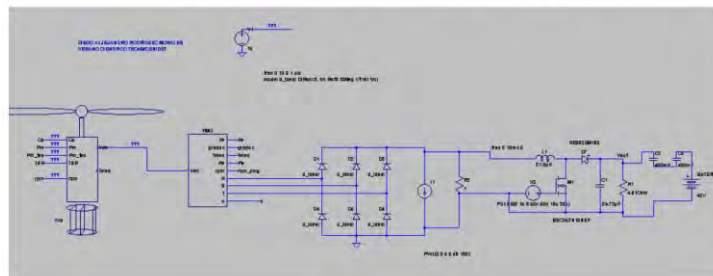
- Diego Rodríguez (Validación canal de riego optimizando batería)

Se seleccionó el canal *subyacente NORTE* del canal de riego Mochis-Ej. 9 de diciembre con las características resumidas de:

Velocidad de flujo de 0.32 m/s, una base de 1.2 metros y una altura de 0.87 metros, tipo de sección rectangular.



11. Sistema de Cosecha de Energía Completo:



ANEXO E. Curso LTspice impartido a estudiantes de maestría



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

FHER SAID MACEDO GARCÍA

TECNM/CENIDET

POR SU VALIOSO Y GENEROSO APOYO EN LA IMPARTICIÓN DEL CURSO: PLATAFORMA LT SPICE PARA DESARROLLO DE MODELOS Y SIMULACIONES EN APLICACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA, CON UNA DURACIÓN DE 30 HORAS, IMPARTIDO A ESTUDIANTES DEL CENIDET, DEL 02 AL 06 DE ENERO DE 2023.

CUERNAVACA, MORELOS, 9 DE FEBRERO DE 2023



MGF008223

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

rYg+H01MDCacdksZVqtZIRXWvbJpFuq0J2TwhDeZlBg3QXpLndfeYVE1Rm050VZRHqDp+P1M9vqcP4LZnHx50
KjeXA/R/PQ6TLr1aRSjGrJb/plcA16RR3f198nsLUPGouTJAtaJj0wCXt1m4PDS1wX1cMB/B2zg10rMBRR5X8T
BexWUcv006rByuKyJ1e064nkK3295gogf5skfuNO2CH1p0QnFa5B1mJjVY7yXI17Xh5JjVhVEzOedaJe9nY2Q1
wc40TPbH0tTrDCgR+IoPEdvJ1xz1TdmVHnKW7eS39R+0qah9RQWmKaLxsTZwHs1Id066BYQ0yHer3VK/T15Q--

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Hydraulic Energy Harvesting Systems With Hydrokinetic Microturbines, an Alternative of Energy Generation for Electrification of Rural Houses.

Fher Said Macedo *, Ismael Hernández-Orozco *, Jaime Arau *,
Manuel Rico-Secades**

*Tecnológico Nacional de México, CENIDET, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

(e-mail: {m22ce017, m22ce062, jaime.ar} @cenidet.tecnm.mx).

**Universidad de Oviedo, EPI Gijón, C.P. 33203, Gijón, Asturias, España.

(e-mail: mrico@uniovi.es).

Abstract: In this paper, an alternative for electricity generation from the use of renewables energies is analyzed, using as generation element, vertical axis hydrokinetic microturbines. Also are discussed the generation capacity and versatility of applications that could be given to this type of systems, mainly to be able to electrify rural houses that are isolated from the electrical grid and have a river or irrigation canal near them. Its main advantages are presented, as well as the generation capacity of these turbines. The concept of extended power coefficient is introduced for its application in water channels. Also, the interesting challenges involved in the development of this type of systems are mentioned, as well as the work opportunities in the power electronics stage.

Keywords: Power coefficient, water flow, hydrokinetic hydraulic turbines, electrification of rural houses.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de alternativas para la generación de energía eléctrica, va en aumento, así mismo el aumento en los compromisos del gobierno del país, tanto de manera nacional e internacional y la búsqueda de estrategias para reducir los efectos contaminantes al obtener energía eléctrica a partir de los combustibles fósiles, deriva a múltiples esfuerzos en los diferentes ámbitos y campos del conocimiento, como son la ingeniería, la ciencia y la tecnología.

El desarrollo de este tipo de proyectos trae consigo amplias ventajas de diferentes tipos, como económicas, ambientales y sociales, de acuerdo con Ramos-Aguilar et al. (2023), la principal transición de las energías no renovables a energías renovables consiste principalmente en la disminución de gases de efecto invernadero.

Es importante mencionar que aún existen en el país algunos lugares, como casas rurales, que se encuentran aisladas de la red eléctrica, sin acceso a este importante servicio, lo que también deriva a la búsqueda de soluciones de esta problemática, para mejorar las condiciones de electrificación de este tipo de viviendas.

Como alternativa se ha encontrado adecuado el uso de sistemas con paneles fotovoltaicos, sistemas eólicos, o sistemas hidráulicos, entre otros; sin embargo, los primeros dos tienen limitantes ya que dependen de variables como la irradiancia solar, así como del viento, lo que causa cambios inesperados en la generación de energía; en cambio en el presente documento, se plantea la alternativa de obtención de energía a partir de las corrientes del agua con microturbinas hidrocineéticas, colocándolas en ríos de bajo cauce o canales de

riego, para la electrificación de casas rurales aisladas de la red eléctrica, denotando su ventaja frente a otros sistemas de cosecha de energía, ya que no presenta cambios bruscos en la energía disponible (como es el caso del recurso solar y eólico). Por esta y otras razones, se ha encontrado viable de este tipo de elementos de generación de energía. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de estas microturbinas hidrocineéticas de eje vertical, en este caso tipo Gorlov.

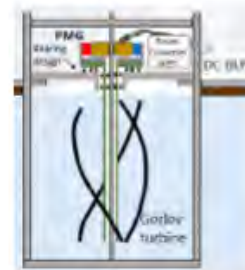


Fig. 1. Turbina hidrocineética de eje vertical tipo Gorlov.

Las microturbinas hidrocineéticas se han encontrado como alternativa para la generación de energía eléctrica, estas presentan ventaja frente a las turbinas tradicionales o sistemas hidroeléctricos, los cuales cumplen con su función de ajustar las curvas de demanda, pero tienen la desventaja de ser costosos y con alto tiempo de construcción (por meses o años), así mismo de acuerdo con Álvarez et al. (2017), las microturbinas hidrocineéticas generan energía, sin presas ni otras estructuras, únicamente a partir de la energía cinética de las corrientes de agua, como caudales fluviales, corrientes de marea, flujos de canales, etcétera.

ANEXO G. Estancia de investigación, Universidad de Oviedo, España



ASUNTO: Carta de invitación

A quien corresponda:

Manuel Rico Secades, Doctor Ingeniero Industrial y Catedrático de la Universidad de Oviedo, adscrito al Departamento de Ingeniería, Eléctrica, Electrónica, Computadores y Sistemas (DIECS) y en representación del grupo oficial de investigación Conversión Eficiente de Energía, Electrónica Industrial e Iluminación (grupo CE3I2) tiene el gusto de invitar a *D. Fher Said Macedo Garcia*, estudiante de Maestría del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) de México, a realizar una estancia de investigación durante el periodo del 17 de setiembre de 2023 hasta el 11 de diciembre del 2023.

Durante la estancia del Sr Macedo, colaboraremos en temas de interés de nuestras líneas de investigación, en particular, dada mi calidad de codirector de su trabajo de su tesis de maestría, colaboraremos en temas de Electrónica de Potencia aplicados al diseño de Turbinas Hidrocinéticas.

En este contexto, se han planificado una serie de actividades a realizar durante la estancia, en concreto:

- Preparación de un artículo de colaboración en nuestros temas de investigación conjuntos.
- Preparación de los resultados de investigación del trabajo de maestría del Sr Macedo.
- Apoyo en la redacción de tesis de maestría del Sr Macedo
- Colaboración con los proyectos de investigación en marcha en los laboratorios del grupo de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) y del grupo CE3I2 de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI-Gijón)

El grupo de investigación CE3I2 de la Universidad de Oviedo, dotará de espacios y recursos materiales para el desarrollo de la investigación del Sr Macedo durante la estancia, sin que ello signifique ningún otro compromiso de soporte económico por parte de la Universidad de Oviedo.

Y para que conste y surta los efectos oportunos donde proceda, firmo el presente documento en Gijón, a 21 de junio de 2023.

Firmado por RICO SECADES MANUEL - 09351267B
el día 21/06/2023 con un certificado emitido
por AC ENMT Usuarios

Manuel Rico-Secades
(ORCID-ID: <http://orcid.org/0000-0002-5372-0330>)
Catedrático de Universidad
Universidad de Oviedo



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

cenidet[®]
*Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico*