



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**“Comparativa de Estrategias MPPT para Turbinas
Hidrocinéticas Ubicadas en Canales de Agua”**

presentada por

Ing. Ismael Hernández Orozco

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 del 2025



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 20/enero/2025

Oficio No. DIE/009/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ismael Hernández Orozco**, con número de control **M22CE062** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"COMPARATIVA DE ESTRATEGIAS MPPT PARA TURBINAS HIDROKINETICAS UBICADAS EN CANALES DE AGUA"**, 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 09884229

CODIRECTOR DE TESIS

Firmado por RICO SECADES MANUEL -
***5116** el día 22/01/2025 con un certificado
emitido por AC FNMU Usuarios

Dr. Manuel Rico Secades
Doctor Ingeniero Industrial
Cédula profesional: Colegiado número 735 del
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

C.p. M.T.I. Maria Elena Gómez Torres. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 04/febrero/2025

Oficio No. SAC/050/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ISMAEL HERNÁNDEZ OROZCO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

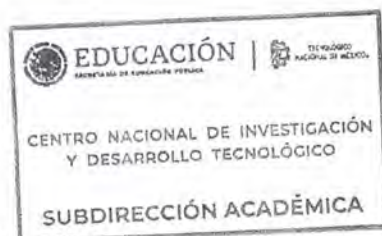
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "COMPARATIVA DE ESTRATEGIAS MPPT PARA TURBINAS HIDROCINÉTICAS UBICADAS EN CANALES DE AGUA", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por 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.

A T E N T A M E N T E

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



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Dedicatoria

Este proyecto está dedicado, con profundo cariño, a todas aquellas personas que han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional. En especial, expreso mi más sincero agradecimiento a mis seres queridos, quienes me han brindado un apoyo incondicional y la oportunidad de continuar con mis estudios.

A mi padre, Luis Hernández Rico, y a mi madre, Rosa Orozco Aguilar, les debo mi más profundo agradecimiento por su fe en mí y por haberme ofrecido el regalo más valioso que un padre puede dar: su amor incondicional, el cual ha sido mi mayor motivación para alcanzar mis metas, aun en medio de los desafíos.

A mis hermanos, Rocío Hernández Orozco y David Hernández Orozco, así como a mi cuñado, José M. Sánchez, y a mi cuñada, Edith Zúñiga, también a mi sobrino Axel G. Cuellar Hernández a quienes les agradezco por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a toda mi familia por su apoyo constante durante esta etapa tan significativa de mi vida.

Agradecimientos

“En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios por permitirme alcanzar este momento junto a colegas, profesores y familiares excepcionales. A lo largo de este proceso, he contado con el inestimable apoyo de muchas personas, a quienes me gustaría reconocer en estas líneas por su valiosa contribución durante la investigación y redacción de este trabajo.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por otorgarme una beca que fue fundamental para la conclusión de mi grado académico. Su apoyo no solo contribuyó al desarrollo de esta investigación, sino que también permitió que pudiera enfocarme plenamente en mis estudios.

Asimismo, agradezco al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por proporcionarme las instalaciones y las atenciones necesarias para llevar a cabo este trabajo. Su respaldo y los recursos brindados jugaron un papel clave en el desarrollo de esta tesis, facilitando un ambiente propicio para el aprendizaje y la investigación.

Quiero expresar un especial agradecimiento a mis asesores, el Dr. Jaime E. Arau Roffiel y el Dr. Manuel Rico S., por su confianza y por proporcionarme las herramientas, el tiempo y el apoyo humano necesarios para alcanzar mis metas. Estoy profundamente agradecido por sus consejos, los cuales me han permitido sentirme más capaz de enfrentar los desafíos, tanto personales como profesionales. Su dedicación como docentes, formando a sus estudiantes con una ética profesional inquebrantable, es digna de admiración y respeto.

Extiendo mi gratitud a mis compañeros y amigos: Felipe de Jesús Cerda, Abraham Madrigal, Jesús Cuellar Martínez, Gerardo Marín, Renato Molina, Eduardo A. Martínez, Ipalnemoani E. Sierra, Fher S. Macedo, Bernardino Arriaga, César Augusto, Jazmín Ramírez, Felipe Ávalos, Gonzalo Valenzuela, Edgar Ruiz, Ángel A. Zúñiga, J. Eduardo Trujillo, Brigit Quezada, Evelin S. Mitzi Mejía, Vianey Medina, Karla P. Hurtado, Rodrigo A. García, María del Carmen Acuña, Pedro Suazo, Juan C. León, Andrea Vega, Isaí González, Portia Cantera, Alexis Bastida, Jorge Yusef, Eric Carranza, Luis Ordaz, Jorge A.

Manzo, Daniel A., Karla Cerda, Mario A. Martínez, Esteban Martínez, Hugo Cendejas, Kimberly Reyes, Ezequiel Domínguez, Arturo D. Espinosa, Jorge de Jesús, y Claudia I. Paz. Sus palabras de aliento y consejos fueron fundamentales para alcanzar este logro personal. Agradezco sinceramente a cada uno de ustedes por su apoyo, y les deseo el mayor de los éxitos en sus respectivos caminos.

Finalmente, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis profesores, el MC. Óscar Fernández Muñoz, y al ingeniero Luis Flores Diego por su orientación y consejos oportunos en los momentos en que más los necesité. Su influencia y guía han sido invaluable, y siempre las llevaré conmigo con respeto y gratitud."

Resumen

En un contexto donde las energías renovables adquieren una importancia creciente, especialmente para la electrificación de zonas con recursos hídricos, las turbinas hidrocinéticas representan una opción viable para convertir la energía cinética del agua en energía eléctrica, además que no requieren de una inversión significativa como lo son las turbinas hidráulicas convencionales. No obstante, estos sistemas hidrocinéticos enfrentan un desafío significativo debido a la intermitencia en la velocidad y altura del fluido, lo que genera variaciones en la potencia extraída. Para abordar esta problemática, se exploraron soluciones en la literatura científica, identificándose la implementación de métodos de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) como una alternativa prometedora. Sin embargo, se encontró que existe una limitada información sobre la aplicación de técnicas MPPT en turbinas hidrocinéticas.

En este contexto, esta tesis presenta un estudio comparativo de diferentes métodos MPPT con el objetivo de contribuir con nueva información al rubro académico. Para ello, se desarrolló un banco de pruebas en el software LTSpice, permitiendo realizar simulaciones del sistema completo. Los resultados obtenidos demostraron un excelente desempeño de las diferentes técnicas MPPT analizadas, evidenciando su efectividad y proporcionando un marco comparativo útil para futuras aplicaciones.

Abstract

In a context where renewable energies are becoming increasingly important, especially for the electrification of areas with water resources, hydrokinetic turbines represent a viable option for converting the kinetic energy of water into electrical energy, and do not require a significant investment as conventional hydraulic turbines (Pelton, Francis and Kaplan). However, these hydrokinetic systems face a significant challenge due to the intermittency in the speed and height of the fluid, which generates variations in the extracted power. To address this issue, solutions were explored in the scientific literature, identifying the implementation of maximum power point finding (MPPT) methods as a promising alternative. However, it was found that there is limited information on the application of MPPT techniques in hydrokinetic turbines.

In this context, this thesis presents a comparative study of different MPPT methods with the aim of contributing new information to the academic discipline. For this purpose, a test bench was developed in the LTSpice software, allowing to perform simulations of the complete system. The results obtained showed an excellent performance of the different MPPT techniques analyzed, evidencing their effectiveness and providing a useful comparative framework for future applications.

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Tabla de contenido.....	III
Lista de figuras.....	VI
Lista de tablas	VIII
Nomenclatura.....	IX
Acrónimos.....	X
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Introducción	2
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 General.....	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Antecedentes	5
1.5 Justificación.....	6
1.6 Alcances y acotaciones.....	6
1.6.1 Alcances:.....	6
1.6.2 Acotaciones:.....	7
1.7 Organización del documento de tesis.....	7
Capítulo 2 Marco Teórico y Revisión bibliográfica	9
2 Marco teórico y revisión bibliográfica	10
2.1 Marco teórico	10

2.1.1	Turbinas hidrocinéticas.....	11
2.1.2	Generador de Imanes Permanentes (PMG).....	13
2.1.3	Convertidor Electrónico de Potencia	13
2.1.4	Métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)	15
2.1.5	Software LTSpice	19
2.2	Revisión del estado del arte.....	21
2.2.1	Trabajos en LTspice.....	21
2.2.2	Aplicación del algoritmo P&O y HCS.....	21
2.2.3	Aplicación de técnicas Cuasi-MPPT o Feedforward	23
2.2.4	Conclusiones de la revisión del estado del arte.	26
Capítulo 3 Desarrollo y Resultados		29
3	Desarrollo y resultados	30
3.1	Metodología para el banco de pruebas.....	30
3.1.1	Descripción del sistema para hacer MPPT.	30
3.1.2	Explicación del sistema implementado en LTSpice	32
3.1.3	Desarrollo de Técnicas y algoritmos MPPT	43
3.1.4	Técnica MPPT con relación a las revoluciones por minuto.	47
3.1.5	Técnica MPPT midiendo la frecuencia.....	50
3.1.6	Cuadro resumen de técnicas cuasi-MPPT.....	53
3.1.7	Algoritmos MPPT Tradicionales	54
3.1.8	Cuadro resumen del algoritmo P&O.....	57
3.1.9	Cuadro resumen del algoritmo INC	59
3.2	Resultados de investigación	60
3.2.1	Resultados de simulación de las técnicas cuasi-MPPT o Feedforward	61
3.2.2	Resultados de simulación de conductancia incremental	68

3.3	Conclusiones de resultados	71
3.3.1	Comentarios de las técnicas de cuasi-MPPT o Feedforward.....	72
3.3.2	Comentarios de los algoritmos de búsqueda activa (P&O, INC)	73
3.3.3	Conclusión del mejor método	74
Capítulo 4	Conclusiones y futuros trabajos	76
4	Conclusiones.....	77
4.1	Trabajos a futuro	78
4.2	Productos académicos	79
Bibliografía.		81
Anexo A		I

Lista de figuras

Figura 1.1 Diagrama a bloques de un sistema.	2
Figura 1.2 Curvas de potencia de una turbina a diferentes velocidades del agua [5].	4
Figura 2.1 Sistema hidrocínético.	10
Figura 2.2 Turbinas hidrocínicas [15].	12
Figura 2.3: Curva de potencia de una turbina.	16
Figura 2.4: MPPT buscando la I_{eqv} en la turbina.[21]	18
Figura 2.5: La potencia de salida [4].	22
Figura 2.6: Turbina con un perfil de velocidad del viento escalonado [25].	24
Figura 2.7: Diagrama de la estrategia de control (frecuencia eléctrica) [26].	25
Figura 3.1: Diagrama del sistema bajo estudio.	31
Figura 3.2: Sistema implementado en LTSpice.	33
Figura 3.3: Bloque de la turbina.	37
Figura 3.4: Modelo del conjunto turbina-PMG.	38
Figura 3.5: Modelo eléctrico del acoplamiento turbina-PMG.	39
Figura 3.6: Bloque del generador eléctrico (PMG).	41
Figura 3.7: Simulación en LTSpice con velocidad del fluido constante.	41
Figura 3.8: Banco de pruebas para pruebas de MPPT.	43
Figura 3.9: Señal de test para todas las simulaciones.	44
Figura 3.10: Máquina de estados de forma analítica para V_f	45
Figura 3.11: Bloque de cuasi-MPPT para medir la velocidad del fluido y TSR.	47
Figura 3.12: Máquina de estados de forma analítica para rpm.	48
Figura 3.13: Bloque de cuasi-MPPT para medir los rpm.	50
Figura 3.14 Máquina de estados de forma analítica para rpm.	51

Figura 3.15: Bloque de cuasi-MPPT para medir la frecuencia eléctrica.	53
Figura 3.16: Diagrama de la máquina de estados del P&O.	55
Figura 3.17: Curva de potencia de la turbina con P&O.	56
Figura 3.18: Bloque de máquina de estados del P&O en LTSpice.	57
Figura 3.19: Diagrama de la máquina de estados del INC.	58
Figura 3.20: Funcionamiento del algoritmo INC en la curva de potencia.	59
Figura 3.21: Resultados de simulación midiendo la velocidad del fluido.	62
Figura 3.22: Resultados de simulación midiendo las revoluciones.	63
Figura 3.23: Resultados de simulación midiendo la frecuencia eléctrica.	64
Figura 3.24: Resultados de simulación P&O a partir de la tensión de salida.	66
Figura 3.25: Resultados de simulación P&O a partir del rpm.	67
Figura 3.26: Resultados de simulación P&O a partir de la frecuencia eléctrica.	68
Figura 3.27: Resultados de simulación INC a partir de la tensión de salida.	69
Figura 3.28: Resultados de simulación INC a partir del rpm.	70
Figura 3.29: Resultados de simulación INC a partir de la tensión de salida.	70

Lista de tablas

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas entre técnicas MPPT.	28
Tabla 3.1: Parámetros de entrada del sistema en simulación.....	32
Tabla 3.2: Resumen de técnicas cuasi-MPPT o Feedforward.	53
Tabla 3.3: Resumen del algoritmo Perturbar & Observar.	57
Tabla 3.4: Resumen del algoritmo Conductancia Incremental.....	60
Tabla 3.5: Tabla comparativa de estrategias MPPT.	71

Nomenclatura

Abreviatura	Significado
ρ	Densidad del agua (Kg/m^2)
P	Potencia eléctrica (W)
Pf_{max}	Potencia extraíble (W)
A_{tur}	Área de la turbina (m^2)
r	Radio (m)
Rf	Resistencia de Fase ($Ohms$)
TSR o λ	Relación punta-velocidad o por el inglés; Tip Speed Ratio (adimensional)
ω	Velocidad angular (rad/seg)
Pm	Potencia Mecánica Útil (W)
$Pteo$	Potencia Teórica (W)
$Tmec$	Par mecánico ($Pm * \omega_m$)
Fe	Frecuencia eléctrica (Hz)
Vdc	Tensión Estimada (V)
Vff_{max}	Tensión máxima de alterna entre fases (V)
C	Capacitancia (F)
J	Movimiento de inercia (kg/m^2)
Jt	Movimiento de Inercia de la Turbina (kg/m^2)
Jm	Movimiento de Inercia del Motor (kg/m^2)
Kv	Coeficiente de voltaje – velocidad del PMG ($V/krpm$)
Lf	Inductancia de Fase (H)
F	Coeficiente de Rozamiento (Nms/rad)
I	Corriente (A)
I_{ref}	Corriente de Referencia (A)
$Ieqv_{cal}$	Corriente Equivalente Calculada (A)
Pr	Potencia Fase R (W)
Ps	Potencia Fase S (W)
Pt	Potencia Fase T (W)

Acrónimos

Abreviatura	Significado
CA	Corriente Alterna
CA/CD	Corriente Alterna – Corriente Directa
CD	Corriente Directa
CD/CD	Corriente Directa – Corriente Directa
PMG	Permanent Magnet Generator
PP	Pares de Polos
RPM	Revoluciones por minuto
Cp	Coeficiente de potencia
Cp_opt	Coeficiente de potencia Óptimo
MPPT	Seguidor del Punto de Máxima Potencia, por sus siglas en inglés
MPP	Punto de Máxima Potencia, pos sus siglas en inglés
K1	Constante para ajuste hidrodinámico 1
K2	Constante para ajuste hidrodinámico 2
K3	Constante para par de arranque de turbina
K5	Constante para desarrollo de cuasi MPPT con medición de rpm
K6	Constante para desarrollo de cuasi MPPT con medición de frecuencia
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

En un mundo donde la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles se ha convertido en una prioridad, el aprovechamiento de fuentes renovables emerge como una alternativa fundamental. En este contexto, Las microturbinas hidrocinéticas, diseñadas para captar la energía del flujo de agua en ríos, arroyos y canales, representan una fuente prometedora para la generación descentralizada de energía eléctrica. Aprovechando la energía cinética del agua en movimiento, estas turbinas pueden operar de manera continua y predecible, lo que las convierte en una opción viable para la electrificación de zonas aisladas que disponen de recursos hídricos [1], [2], [3].

Para conseguir la extracción de potencia eléctrica se plantean diferentes tipos de sistemas, en este caso específico se muestra el siguiente sistema (figura 1.1) el cual se compone de varios elementos clave, incluyendo las propias microturbinas hidrocinéticas, un generador de imanes permanentes (PMG, por sus siglas en inglés) para la conversión de energía mecánica en eléctrica, una etapa de rectificación para acondicionar la corriente generada, convertidor electrónico de potencia y algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia. Este último componente es de especial relevancia y tema de estudio, ya que permite maximizar la eficiencia en la extracción de potencia.

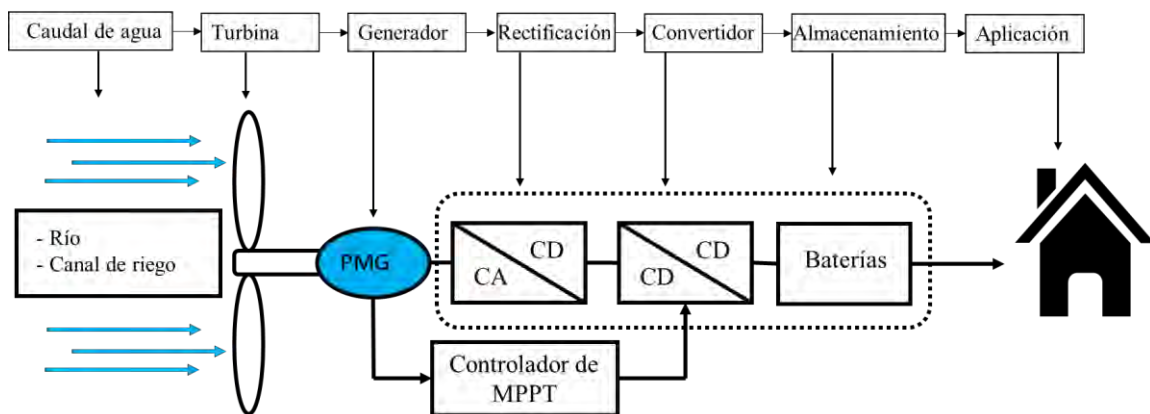


Figura 1.1 Diagrama a bloques de un sistema.

Dentro de este marco, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) se presenta como un componente crucial para optimizar la captación de energía. Las condiciones de flujo de agua pueden ser altamente variables, y esta variabilidad exige que las turbinas operen de manera eficiente bajo distintas condiciones. Para lograr esto, se implementan diversas técnicas y algoritmos de MPPT que permiten ajustar continuamente la operación de las turbinas, asegurando que se capture la máxima energía posible en cada momento [4].

1.2 Planteamiento del problema

El principal desafío en los sistemas de aprovechamiento de energía renovable reside en la naturaleza intermitente de la fuente de energía disponible, como es el caso de la energía hidrocinética. En este contexto, la energía disponible puede depender únicamente de los cambios en la velocidad del agua, como sucede en ambientes de campo abierto (por ejemplo, en el mar o en ríos muy anchos), o bien puede depender tanto de la velocidad como de la altura del agua, como es el caso de los canales.

En ambos escenarios, ya sea en un canal de agua o en un campo abierto, la Figura 1.2 ilustra el comportamiento cualitativo de la potencia que se puede extraer de una turbina en función de la corriente eléctrica demandada por el algoritmo MPPT. En dicha figura se presentan tres curvas de potencia distintas, cada una correspondiente a una velocidad de agua diferente o a cambios en la altura del agua. En cualquier caso, para maximizar la energía extraída, el algoritmo MPPT debe operar en el punto de máxima potencia y adaptarse dinámicamente a las variaciones que se produzcan en el sistema.

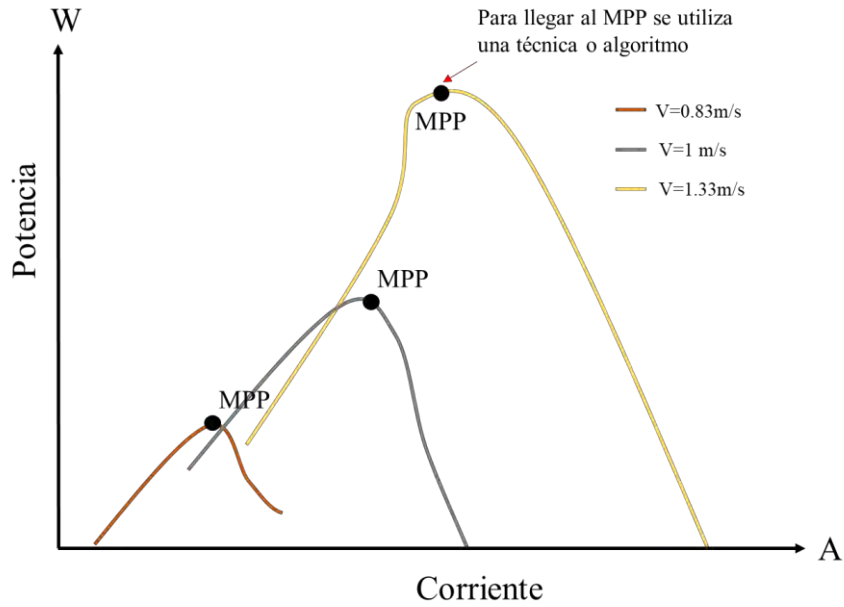


Figura 1.2 Curvas de potencia de una turbina a diferentes velocidades del agua [5].

1.3 Objetivos

Después de analizar la problemática y llevar a cabo una exploración del estado del arte en el campo de la generación de energía mediante microturbinas hidrocinéticas, se ha identificado la necesidad de abordar el desafío del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en estos sistemas.

1.3.1 General

Contar con un estudio comparativo de estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia, de un sistema de cosecha de energía hidráulica, mediante el uso de turbinas hidrocinéticas.

1.3.2 Específicos

- Dominio del marco teórico relacionado con los componentes de un sistema de aprovechamiento de energía hidrocinética, tales como turbinas hidrocinéticas, generadores síncronos de imanes permanentes, convertidores CD/CD y algoritmos MPPT.

- Asimilación del estado del arte sobre las estrategias MPPT disponibles en la literatura y analizar su potencial aplicabilidad en el contexto del presente estudio.
- Validación teórica y experimentalmente, mediante simulaciones en el programa LTSpice, un estudio comparativo de las principales técnicas MPPT seleccionadas, evaluando su viabilidad para su uso en sistemas de aprovechamiento de energía hidrocínética.
- Discusión y difusión de los resultados de la investigación mediante la publicación de al menos un artículo en una revista especializada o la presentación en un congreso académico.
- Proponer nuevas líneas de investigación futura, enfocadas en la etapa de potencia, el tipo de convertidor y las alternativas de control.

1.4 Antecedentes

Con el contexto de los métodos para maximizar la eficiencia en la generación de energía mediante sistemas basados en microturbinas hidrocínéticas presenta desafíos específicos. Uno de los aspectos críticos para alcanzar una alta eficiencia es el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), que asegura que la turbina funcione en su punto óptimo de rendimiento, maximizando así la producción energética [6], [7], [8].

En la literatura científica, se han desarrollado y propuesto diversas estrategias y algoritmos de MPPT para sistemas de energía renovable. Los métodos para encontrar el punto de máxima potencia, cada una con sus propias ventajas y limitaciones. Entre las más utilizadas en estos sistemas, se encuentran los métodos basados en la perturbación y observación (P&O), conductancia incremental (IC) y los algoritmos basados en; frecuencia eléctrica, rpm o velocidad del fluido [9], [10]. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas en el contexto particular de las microturbinas hidrocínéticas ha sido relativamente poco explorada. Por lo tanto, existe una clara necesidad de investigar y comparar diferentes enfoques de MPPT para optimizar el rendimiento de estos sistemas.

1.5 Justificación

La realización de una comparativa de técnicas de MPPT contribuye de manera significativa a mejorar el rendimiento, adaptabilidad y viabilidad económica del sistema de generación de energía a partir de microturbinas hidrocínéticas. Este estudio surge de la necesidad de abordar la problemática existente en la optimización del rendimiento de estos sistemas, como se evidencia en la variabilidad de las curvas de potencia en función de la velocidad del agua en la figura 1.2, o la altura del agua (en el caso de un canal de agua), lo cual requiere una adaptación dinámica para encontrar el punto de máxima potencia (MPP).

La falta de investigación previa sobre las técnicas de MPPT específicas para microturbinas hidrocínéticas subraya la importancia de llevar a cabo este estudio compartido. La escasez de literatura científica en este campo resalta la necesidad de identificar y evaluar las técnicas que mejor se adapten a las características y condiciones variables de estos sistemas, como la simplicidad de implementación y el buen desempeño en diferentes situaciones.

Por lo tanto, este estudio se presenta como una oportunidad para llenar el vacío existente en la literatura científica y proporcionar una guía práctica y fundamentada para diseñadores, ingenieros y desarrolladores interesados en implementar sistemas de generación de energía hidrocínética. Se espera que los resultados de esta investigación no solo contribuyan a mejorar la eficiencia energética y la rentabilidad de estos sistemas, sino también a promover su adopción y aplicación en diferentes contextos, fomentando así el desarrollo sostenible y la inclusión energética en áreas rurales y remotas.

1.6 Alcances y acotaciones

1.6.1 Alcances:

- **Planteamiento del banco de pruebas:** Se diseñó un banco de pruebas que caracteriza cada componente del sistema, incluyendo la turbina, el generador de imanes permanentes (PMG), la etapa de rectificación, un modelo de convertidor de corriente continua (CD) y el MPPT. Este sistema permitió probar diversas metodologías para encontrar el punto de máxima potencia a través de simulaciones.

- **Simulaciones en software:** Se realizaron simulaciones utilizando software de simulación de circuitos eléctricos, como LTSpice, para evaluar el desempeño de las estrategias de MPPT en un entorno controlado y reproducible.
- **Evaluación de estrategias de MPPT:** El estudio se centra en la comparación y evaluación de diferentes estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para su aplicación en sistemas de generación de energía a partir de microturbinas hidrocinéticas.
- **Análisis de resultados:** Se analizaron los resultados obtenidos de las simulaciones para identificar la técnica de MPPT más eficiente en términos de maximización del rendimiento energético y adaptabilidad a las condiciones variables como la velocidad del agua y cambios de altura en el caso de un canal de agua.

1.6.2 Acotaciones:

- **Factores externos no considerados:** El estudio no abordó aspectos externos que puedan afectar el rendimiento del sistema, como la disponibilidad de recursos hídricos, la variabilidad climática o las restricciones geográficas.
- **Validación experimental limitada:** Aunque las simulaciones proporcionaron información útil, la validación experimental en un entorno real podría estar limitada por restricciones de tiempo, recursos y acceso a equipos especializados.
- **Etapas de electrónica de potencia:** No se trabajó a profundidad los convertidores electrónicos de potencia en el sistema y tampoco se abordó la regulación en corriente del convertidor DC-to-DC, se manejó un modelo general del convertidor. También solo se trabajó hasta la etapa de almacenamiento (batería) y faltaría la etapa de convertidor inversor para la aplicación en corriente alterna.

1.7 Organización del documento de tesis

Capítulo 1. En este capítulo se proporciona una contextualización del tema de la cosecha de energía hidráulica, destacando la importancia y relevancia del mismo. Se identifican y

analizan los componentes clave del sistema de cosecha de energía hidrocínética y se presenta la problemática relacionada con la optimización de la eficiencia energética. Además, se justifica la elección de estudiar técnicas y algoritmos MPPT para mejorar el rendimiento de este tipo de tecnologías. Se establecen los objetivos de investigación para guiar el desarrollo del estudio y alcanzar resultados satisfactorios.

Capítulo 2. Este capítulo aborda la comprensión del marco teórico necesario para el análisis del sistema de cosecha de energía hidráulica. Se presentan las partes esenciales del sistema y se realiza una revisión bibliográfica para identificar las técnicas y algoritmos MPPT aplicables en este contexto, mediante herramientas de búsqueda como Connected Papers, Red Cube y Research Rabbit. También se explora el estado del arte en la materia y se investiga si existen estudios comparativos que permitan establecer parámetros de referencia en esta área.

Capítulo 3. En este capítulo se describe detalladamente la metodología utilizada para diseñar y desarrollar el banco de pruebas. Se explica cómo se caracterizó una turbina hidrocínética de manera estándar y cómo se acopló un generador de imanes permanentes (PMG) con su etapa de rectificación, también como parte del sistema se trabajó con un modelo de un convertidor CD-CD, para poder realizar simulaciones con el sistema completo. Se presenta la implementación de diferentes técnicas y algoritmos MPPT previamente seleccionados en el software LTSpice para su evaluación. Se analizan las pruebas de simulación y se comparan los resultados obtenidos para determinar la técnica más eficiente en la generación de energía a partir de microturbinas hidrocínéticas.

Capítulo 4. En este capítulo se presentan las conclusiones generales y específicas derivadas del estudio realizado. Se discuten los resultados obtenidos y se identifican áreas de mejora y posibles líneas de investigación futuras. Se plantean sugerencias para ampliar el alcance del estudio, como investigar sobre convertidores electrónicos de potencia, sistemas de almacenamiento de energía, y la aplicación física de las estrategias MPPT en turbinas hidrocínéticas.

Capítulo 2 Marco Teórico y Revisión bibliográfica

2 Marco teórico y revisión bibliográfica

2.1 Marco teórico

El marco teórico de esta tesis tiene como objetivo establecer una base sólida para el análisis y la comparación de las estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en microturbinas hidrocinéticas. Este capítulo se articula en función de los objetivos generales de la investigación, proporcionando una comprensión detallada de los componentes y principios fundamentales que conforman el sistema estudiado.

Inicialmente, se retoma la referencia presentada en la Figura 1.1 durante la etapa introductoria, donde se desglosan los elementos clave de un sistema de aprovechamiento de energía hidrocinética. En este contexto, el marco teórico no solo aborda los aspectos técnicos de las microturbinas, los generadores síncronos de imanes permanentes y los convertidores CD/CD, sino que también profundiza en los fundamentos teóricos que sustentan el funcionamiento de los algoritmos MPPT.

No obstante, cabe destacar que en el presente trabajo se ha delimitado el análisis hasta la etapa de almacenamiento de energía, tal como se ilustra en la Figura 2.1. A partir de esta delimitación, se procederá a explicar cada una de las etapas del sistema, comenzando por la captación de energía cinética del agua, seguida de su conversión en energía eléctrica, hasta llegar al proceso de almacenamiento, que es fundamental para asegurar la estabilidad y eficiencia del sistema.

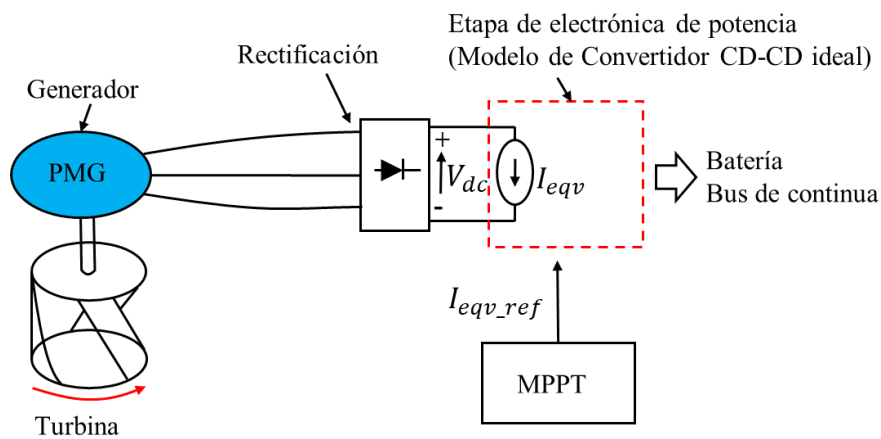


Figura 2.1 Sistema hidrocinético.

2.1.1 Turbinas hidrocinéticas

Tomando como referencia la figura 2.1 se comenzará a hablar de las turbinas hidrocinéticas; son dispositivos que generan energía eléctrica a partir de fuentes renovables, aprovechando la energía cinética de los flujos de agua en ríos de baja velocidad y de bloqueo de agua. Su funcionamiento es similar al de las turbinas eólicas: la energía cinética del flujo de agua se convierte en energía mecánica mediante un rotor, el cual hace girar un generador eléctrico para producir electricidad [11].

Estas turbinas se conocen también como turbinas hidrodinámicas, turbinas de flujo de agua, turbinas de río o turbinas de flujo libre. La clasificación de las turbinas hidrocinéticas se basa principalmente en la orientación de su eje de rotación respecto al flujo del agua, distinguiéndose entre turbinas de eje horizontal (paralelo al flujo de agua), turbinas de eje vertical y turbinas de flujo cruzado (perpendicular al flujo de agua) [12], [13].

2.1.1.1 Tipos de turbinas hidrocinéticas.

El aprovechamiento de las corrientes de flujo de agua para la generación de energía eléctrica se realiza principalmente a través de dos tipologías de turbinas hidrocinéticas: las turbinas de eje horizontal (Horizontal Axis Water Turbines, HAWT) y las turbinas de eje vertical (Vertical Axis Water Turbines, VAWT).

Las turbinas de eje horizontal (HAWT) son similares en diseño a los aerogeneradores utilizados en la energía eólica. Están construidas con un eje de rotación paralelo a la dirección del flujo de agua, lo que permite que sus palas maximicen el área de barrido. Este diseño es particularmente eficiente en la conversión de la energía cinética del agua en energía mecánica, que posteriormente se convierte en energía eléctrica. Las HAWT son ampliamente utilizadas debido a su alta eficiencia y su capacidad para generar una gran cantidad de energía en entornos donde las corrientes de agua son relativamente uniformes y predecibles [11], [14].

Por otro lado, las turbinas de eje vertical (VAWT) tienen un eje de rotación perpendicular al flujo de agua, lo que les permite captar energía desde cualquier dirección del flujo. Este tipo de turbina presenta varias configuraciones, como la de tipo Darrieus, que utiliza palas curvas que giran alrededor de un eje vertical, y la de tipo Savonius, que emplea palas en forma de "S" que giran debido a la diferencia de presión creada por el flujo de agua. Las VAWT tienen la ventaja de funcionar eficientemente en flujos de agua con variaciones direccionales y de velocidad, y su diseño permite una integración más fácil en entornos urbanos o en áreas con restricciones de espacio. Además, son menos afectadas por las turbulencias en el flujo, lo que las hace adecuadas para su uso en canales o ríos con condiciones de flujo más complejas.

La Figura 2.2 ilustra ejemplos de ambas tipologías, mostrando una turbina HAWT (a) y diversas configuraciones de VAWT (b, c, d, e, f). En esta figura se puede apreciar cómo las palas de las turbinas están orientadas para capturar el máximo flujo de agua, optimizando así la extracción de energía.

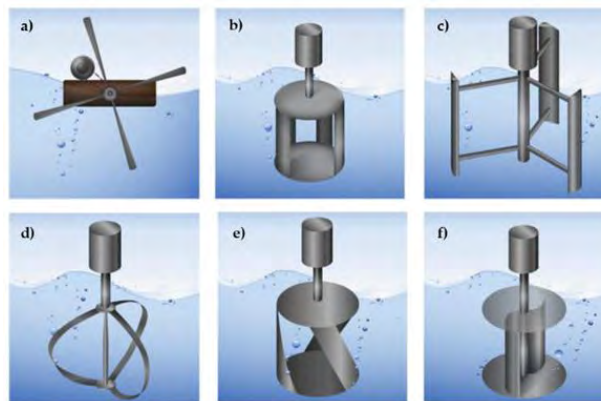


Figura 2.2 Turbinas hidrocínéticas [15].

Las turbinas VAWT, presentan ventajas en ciertas condiciones operativas. Estas turbinas pueden capturar energía independientemente de la dirección del flujo del agua, lo que las hace útiles en entornos con corrientes variables. Además, su diseño compacto permite una instalación más fácil en áreas con restricciones de espacio, como lo son en el planteamiento de este trabajo [12], [15].

2.1.2 Generador de Imanes Permanentes (PMG)

Los generadores de imanes permanentes, por sus siglas en inglés PMG (Permanent Magnet Generator), son máquinas síncronas en las cuales los bobinados del rotor son reemplazados por imanes permanentes. Estos generadores utilizan imanes para crear un campo magnético y, por ende, generar electricidad. Se emplean frecuentemente en aplicaciones que requieren alta eficiencia y durabilidad, como en sistemas de energía renovable y generadores sin escobillas. Una de sus ventajas clave es que no necesitan una fuente de excitación separada, eliminando así las pérdidas asociadas a la excitación, que representan aproximadamente el 30 % del total de pérdidas en un generador [16], [17].

Los PMG ofrecen una alta densidad de potencia, un tamaño más compacto y mayor eficiencia a todas las velocidades, lo que maximiza la productividad durante su ciclo de vida. En sistemas eólicos, por ejemplo, son muy utilizados debido a sus ventajas, especialmente a bajas velocidades del fluido que atraviesa los aerogeneradores. Además, el diseño y construcción de estos generadores permite evitar el uso de una caja de engranajes, lo cual es beneficioso desde una perspectiva económica [18].

2.1.3 Convertidor Electrónico de Potencia

En las turbinas hidrocinéticas se utilizan convertidores de electrónica de potencia, que sean capaz de ajustar la potencia de salida. Estos dispositivos aplicados en sistemas de energía hidráulica son llamados convertidores electrónicos de potencia, los cuales se encargan de tener un control de la energía, mediante procesos de conmutación, utilizando componentes de alta frecuencia, (diodos, bobinas, capacitores, transistores, resistencias) [19].

En tales aplicaciones, la electricidad producida por el generador y los controles permitidos por los circuitos electrónicos se utilizan para controlar la conducción (encendido y apagado) de los semiconductores de potencia para administrar la corriente y el voltaje en las aplicaciones de potencia. Esto se logra formando un dispositivo conocido como convertidor de potencia estático.

De esta forma, la electrónica de potencia permite la regulación y conversión de energía eléctrica para diferentes propósitos, como alimentar otros dispositivos de forma controlada, convertir energía eléctrica de corriente continua a corriente alterna y viceversa, y controlar

la velocidad y funcionamiento de motores eléctricos. Mediante el uso de dispositivos electrónicos, principalmente semiconductores.

El principal objetivo de esta disciplina es el manejo y transformación de la energía de una forma eficiente, por lo que se evitan utilizar elementos resistivos, potenciales generadores de pérdidas por efecto Joule. Los principales dispositivos utilizados por tanto son bobinas y condensadores, así como semiconductores trabajando en modo corte/saturación (T_{on}/T_{off}) [19].

Los convertidores pueden clasificarse según diferentes criterios según el formato de las energías de entrada y salida. Básicamente y según este criterio pueden establecerse cuatro grandes grupos

- Convertidores CA/CD o rectificadores.

Este tipo de convertidores transforman corriente alterna, monofásica o trifásica, en continua. Desde el punto de vista de los accionamientos, presentan una importancia fundamental en varias máquinas industriales.

- Convertidores CD/CD.

Es importante mencionar que la regulación de este convertidor se realiza en la corriente de entrada. Sin embargo, el diseño específico de este regulador o las técnicas empleadas para llevar a cabo esta función no se encuentran contempladas en este trabajo. La función principal del convertidor es tomar una entrada de corriente continua a un nivel de voltaje determinado y producir una salida de corriente continua a un nivel de voltaje diferente. Existen diversas topologías de convertidores, como Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Zeta y Flyback, entre otras. Aunque algunas de estas topologías son equivalentes entre sí, cada circuito presenta características particulares, por lo que es fundamental realizar una selección adecuada del convertidor según los requerimientos específicos de cada aplicación. Descripción de los convertidores en anexo A.

2.1.4 Métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

El seguidor del punto de máxima potencia o *MPPT* por sus siglas en inglés “*Maximum Power Point Tracker*” es una forma de extraer la máxima potencia eléctrica de un sistema en el caso particular en las turbinas hidrocinéticas [20]. Sin embargo, la necesidad de detectar la velocidad del flujo de agua y la velocidad de la turbina hidrocinética ha sido una barrera para la implementación de técnicas de control MPPT en este tipo de sistemas de captación de energía hidráulica. Al implementar este método de búsqueda del punto de máxima potencia en el modelo propuesto, se espera que el sistema mantenga un rendimiento estable, incluso cuando los parámetros del sistema cambien frecuentemente.

Los métodos de búsqueda de MPPT, ya sea a través de algoritmos tradicionales de búsqueda activa o mediante técnicas que, aunque no se consideren estrictamente algoritmos MPPT, cumplen con la función de encontrar el punto de máxima potencia, deben ser evaluados con cuidado. Es importante diferenciar entre el término "técnica" y "algoritmo" para comprender adecuadamente los siguientes puntos. En esencia, el objetivo básico de cualquier método MPPT es identificar la máxima potencia extraíble del sistema, en este caso, de sistemas equipados con turbinas hidrocinéticas.

En la Figura 2.3 se presenta una curva de potencia de la turbina, que ilustra el objetivo de cada método de MPPT. En uno de los ejes de la figura se muestran las posibles variables a medir, como el TSR (Tip Speed Ratio), las RPM, la frecuencia eléctrica, el par óptimo, la tensión y la corriente. Estas son algunas de las formas de determinar la potencia de salida del sistema. Con la técnica adecuada, es posible mantener la turbina PMG (Permanent Magnet Generator) en su punto óptimo, asegurando la máxima potencia en todo momento.

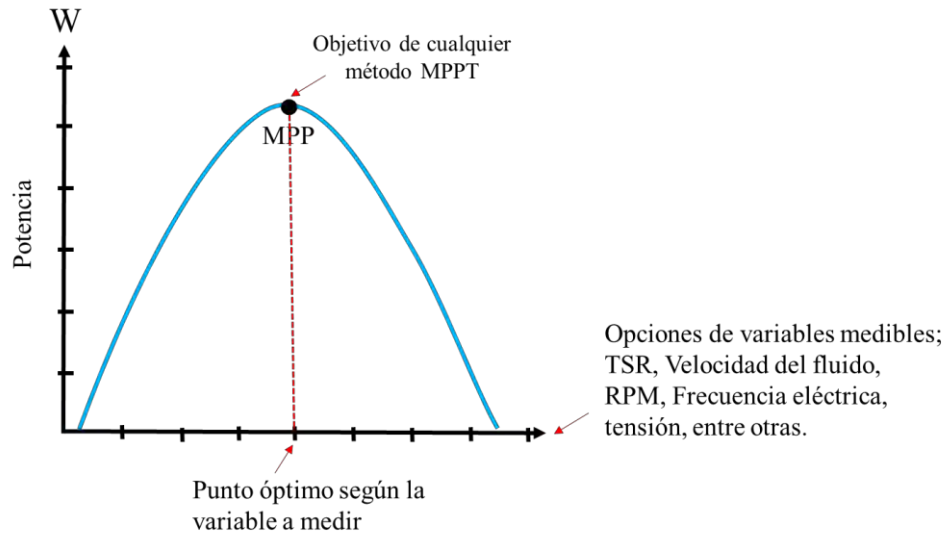


Figura 2.3: Curva de potencia de una turbina.

2.1.4.1 Técnicas Cuasi-MPPT

El término "técnica" en este contexto se refiere a los métodos empleados para identificar el punto de máxima potencia (MPP) de un sistema, utilizando el conocimiento previo de sus componentes, como la turbina y el generador síncrono de imanes permanentes (PMG). A diferencia de los algoritmos MPPT convencionales, que requieren una búsqueda activa y continua del MPP, las técnicas cuasi-MPPT (también conocidas como control en bucle abierto o Feedforward) aprovechan las características conocidas del sistema para aproximarse al MPP sin la necesidad de esta búsqueda activa.

Estas técnicas se basan en la comprensión profunda del comportamiento de la planta, permitiendo una estimación precisa de la potencia que puede extraerse. Por ejemplo, al medir la velocidad del fluido que incide sobre la turbina (como en el caso de las turbinas hidrocinéticas), se puede calcular la potencia disponible, evitando la necesidad de implementar un algoritmo de seguimiento activo [21].

Dentro de las técnicas cuasi-MPPT, existen diversas formas de implementación. Una de ellas consiste en estimar la potencia extraíble a través de la medición de la frecuencia eléctrica en la salida del generador. Esto se puede lograr mediante la utilización del sensor como el frecuencímetro, que proporcionan datos clave para ubicar el punto de máxima potencia de manera más eficiente y directa. También en las turbinas se pueden implementar diferentes sensores como lo son; caudalímetro, tacómetro, voltímetro entre otros, para saber la potencia de salida

Además de las metodologías mencionadas para hacer MPPT, otras de las formas de implementación de MPPT en turbinas hidrocinéticas puede lograrse mediante la medición directa de varios parámetros clave. Entre ellos se incluyen el par óptimo y la tensión. Estas mediciones permiten ajustar dinámicamente las condiciones operativas de la turbina para asegurar que siempre se opere en el punto de máxima eficiencia, maximizando la generación de energía.

Los algoritmos cuasi-MPPT no solo ofrecen un punto de partida aproximado para la operación del sistema, sino que también pueden servir como base para algoritmos MPPT más sofisticados que requieren una búsqueda activa del MPP. Al proporcionar una estimación inicial del MPP, estas técnicas permiten que el sistema opere cerca de su máxima eficiencia desde el inicio, mejorando así la velocidad de respuesta y la estabilidad del proceso de optimización de la potencia.

2.1.4.2 Algoritmos MPPT

Un algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) es un sistema que busca activamente el punto de máxima potencia (MPP). Puede aplicarse a diversas fuentes de energía renovable, como la solar, eólica, hidráulica, entre otras. Es importante destacar que el MPP es variable y depende de las condiciones de operación en cada momento. Por ejemplo, si cambia la velocidad del fluido, el punto MPP también cambiará. Por lo tanto, un algoritmo MPPT está diseñado para estar "siempre activo".

Existen diferentes enfoques para implementar estos algoritmos, lo que da lugar a una variedad de procedimientos (Técnicas) y algoritmos. La idea principal es ajustar la demanda de energía del convertidor de potencia mediante la modificación de algunos parámetros de control.

En el caso específico de las turbinas hidrocinéticas, resulta especialmente interesante modificar la corriente demandada en la salida del rectificador trifásico (representada como I_{eqv} en las figura 2.4, aunque existen otras opciones como el ciclo de trabajo o el par demandado. Después de realizar la modificación, se observa si nos acercamos o alejamos del MPP.

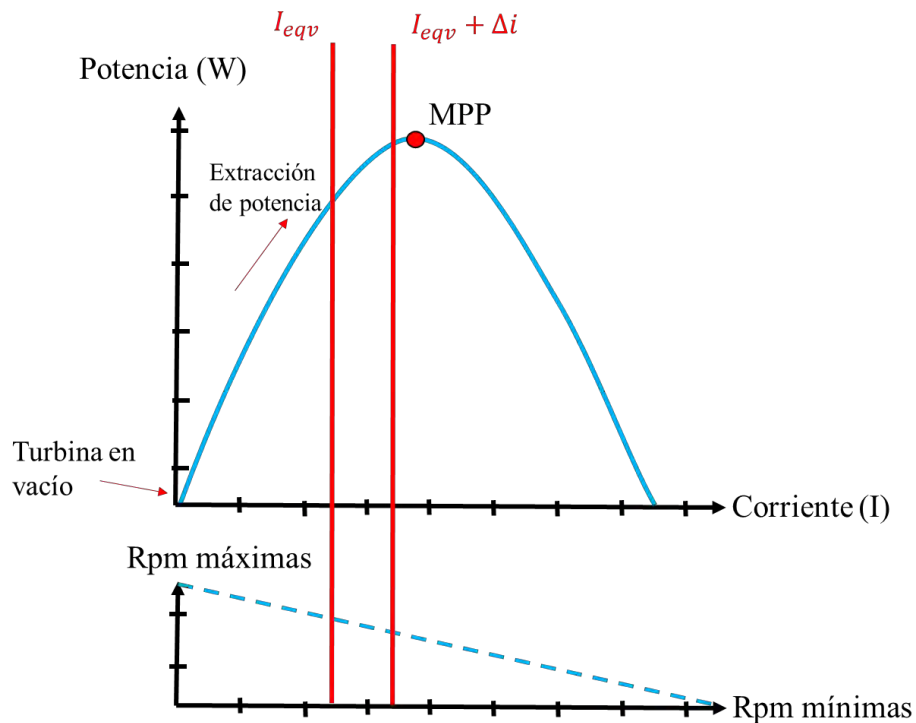


Figura 2.4: MPPT buscando la I_{eqv} en la turbina.[21].

La observación del sistema para determinar si nos acercamos o alejamos del punto MPP ha dado lugar a diversas alternativas utilizadas en los diferentes algoritmos, muchos de los cuales tienen diferentes opciones de implementación:

- Observar la derivada de la potencia demandada, ya sea positiva o negativa. Esto da lugar a otro algoritmo conocido como "Algoritmo de la conductancia incremental". Este enfoque es ampliamente utilizado en el campo de la energía solar, pero su implementación es diferente en los sistemas eólicos o hidráulicos.
- Observar la potencia demandada por el convertidor, para saber en qué lado de la curva de potencia se encuentra el método MPPT. Este enfoque es uno de los más populares y se conoce comúnmente como "algoritmo Perturbar y Observar" (aunque sería más preciso llamarlo "Perturbar, esperar y Observar" por el tiempo de espera de un sistema con turbinas) [5].

2.1.5 Software LTSpice

LTSpice es una herramienta de simulación de circuitos ampliamente reconocida en el ámbito de la ingeniería eléctrica y electrónica. Desarrollado por Linear Technology (ahora parte de Analog Devices), este software permite a los ingenieros modelar y simular el comportamiento de circuitos electrónicos con alta precisión y eficiencia.

En el contexto de sistemas de microturbinas hidrocinéticas, LTSpice es utilizado para modelar y evaluar componentes clave del sistema, como generadores de imanes permanentes, etapas de rectificación y convertidores electrónicos de potencia. Su capacidad para simular circuitos completos en un entorno computacional facilita el análisis del comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, proporcionando información crítica para optimizar el diseño y la implementación de estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

Una de las ventajas principales de LTSpice es su capacidad para proporcionar simulaciones detalladas de fenómenos transitorios, tiempos de propagación, oscilaciones y otros efectos no deseados que pueden influir en el desempeño de los circuitos. Esta información es crucial para verificar la correcta operación del diseño y asegurar el

cumplimiento de las especificaciones establecidas, permitiendo a los ingenieros identificar y corregir posibles problemas antes de la implementación física del sistema.

LTSpice ofrece una interfaz amigable y una biblioteca extensa de componentes electrónicos, facilitando la creación de esquemas y la realización de simulaciones complejas. Su capacidad para realizar análisis de pequeños y grandes señales, junto con la posibilidad de ajustar parámetros y condiciones de operación en tiempo real, lo convierte en una herramienta versátil y poderosa para el desarrollo y optimización de sistemas de energía renovable y otros dispositivos electrónicos avanzados.

2.2 Revisión del estado del arte

El presente estudio comparativo se enfoca en realizar un análisis del estado del arte en el ámbito de las turbinas hidrocínéticas y las estrategias de control para el MPPT utilizadas en sistemas hidrocínéticos. Para ello, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en la literatura científica y técnica utilizando herramientas de búsqueda especializadas como Connected Papers, Red Cube y Research Rabbit, IEEEExplore, Google Académico.

Nota: Por la falta de información respecto al tema estudiado en turbinas hidrocínéticas, se contemplaron dos tipos de sistemas (eólico e hidrocínético) por la gran similitud que tienen y con sus resultados se opusieron obtener conclusiones más claras respecto a esta revisión. También hacer mención que dichas conclusiones de esta actividad dieron pie para realizar una selección de algoritmos, para comparar. Algoritmos que cumplieran, eficiencia, confiabilidad, bajo costo, bajo mantenimiento y de complejidad media baja.

2.2.1 Trabajos en LTspice

Adicionalmente, se analizó una tesis doctoral [22], considerada clave debido a su estrecha relación con el presente trabajo, ya que en ella se evaluaba el desempeño de una turbina eólica mediante el uso del software LTSpice. Este análisis facilitó una mejor comprensión del banco de pruebas empleado para la comparación de técnicas. Se examinaron partes del modelo matemático presentado en dicha tesis con el fin de adaptar el banco de pruebas a las necesidades específicas de esta investigación, enfocadas en la aplicación de turbinas hidrocínéticas.

2.2.2 Aplicación del algoritmo P&O y HCS

En esta sección se presentan los algoritmos "Perturbar y Observar" y "Búsqueda Ascendente en Colina". Estos algoritmos se exponen conjuntamente debido a su relación, ya que en el caso del HCS (por sus siglas en inglés) se utiliza el nombre "colina" para hacer referencia a la forma característica de su gráfica de potencia eléctrica. A pesar de esta diferencia conceptual, ambos algoritmos comparten el mismo principio de funcionamiento.

En los trabajos [23], [24], se propone un algoritmos novedosos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para sistemas de energía eólica. Donde dichos trabajos mencionan que supera las limitaciones del método convencional de búsqueda ascendente en colina (HCS). El algoritmo se adapta a las condiciones cambiantes del viento y logra una mayor eficiencia de control. Se utiliza una capacidad de detección de picos novedosa y se desarrolla un esquema inteligente sin sensor de velocidad. Los resultados experimentales muestran su mayor velocidad y eficiencia en comparación con el HCS convencional.

En este trabajo [4], se propone un diseño de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para un sistema picohidrocinético en aplicaciones fluviales. La topología del diseño incluye un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG), un puente rectificador trifásico y un convertidor elevador de corriente continua (CC). El algoritmo MPPT combina el algoritmo de búsqueda de escalada modificado (MHCS) con un controlador PI actual. En la figura 3.1 se puede apreciar los resultados de [4], donde se muestran 2 graficas, una con un algoritmo clásico y el otro con una respectiva mejora. En la siguiente página se encuentra su descripción.

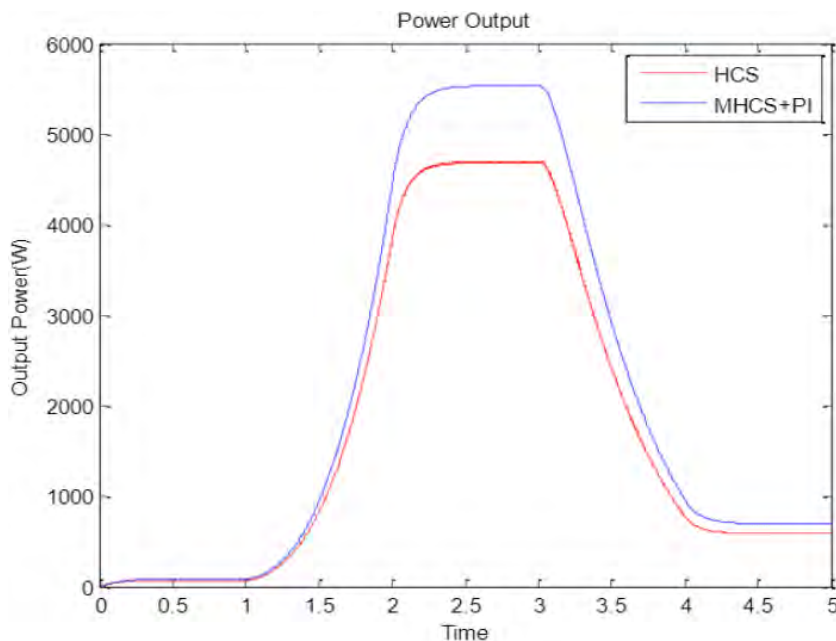


Figura 2.5: La potencia de salida [4].

El concepto MPPT se basa en medir el voltaje y la corriente de salida del rectificador para producir la corriente de referencia (IMPP). El controlador PI ajusta la señal de error entre la corriente IMPP y la corriente de inductancia real (I_{dc}) para proporcionar el ciclo de trabajo del convertidor elevador. Se realizó una comparación entre el método de paso fijo (HCS) y el MPPT propuesto para evaluar su rendimiento. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto puede aprovechar la potencia máxima con una eficiencia del 96.32%.

2.2.3 Aplicación de técnicas Cuasi-MPPT o Feedforward

Lo que se vio en la literatura; este tipo de métodos son alternativas para encontrar el punto de máxima potencia, dominándolas como técnicas ya que son formas de ajusta el sistema para mantenerlo en un trabajo óptimo de generación de potencia eléctrica, entonces no se pueden considerar algoritmos tradicionales o como en este documento se manejan como de búsqueda activa. Sin embargo, este tipo de técnicas, pueden carecer de efectividad con el transcurso del tiempo por el desgaste mecánico del sistema y tienden a ser algo impredecibles, esto se puede prevenir con un buen mantenimiento predictivo. A continuación, se mostrarán algunos de los trabajos que dieron ideas clave para replicar este tipo de técnicas en este trabajo de investigación.

El estudio [25] presenta una revisión exhaustiva de los controladores MPPT en sistemas de generación eólica, tanto pasados como actuales, empleados para maximizar la extracción de potencia en sistemas de conversión de energía eólica (WECS) que utilizan generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG), generadores de inducción de jaula de ardilla (SCIG) y generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG). Estos controladores se clasifican en tres categorías principales: el control basado en la relación de velocidad de punta (TSR), el control por realimentación de la señal de potencia (PSF) y el control mediante búsqueda de ascenso (HCS).

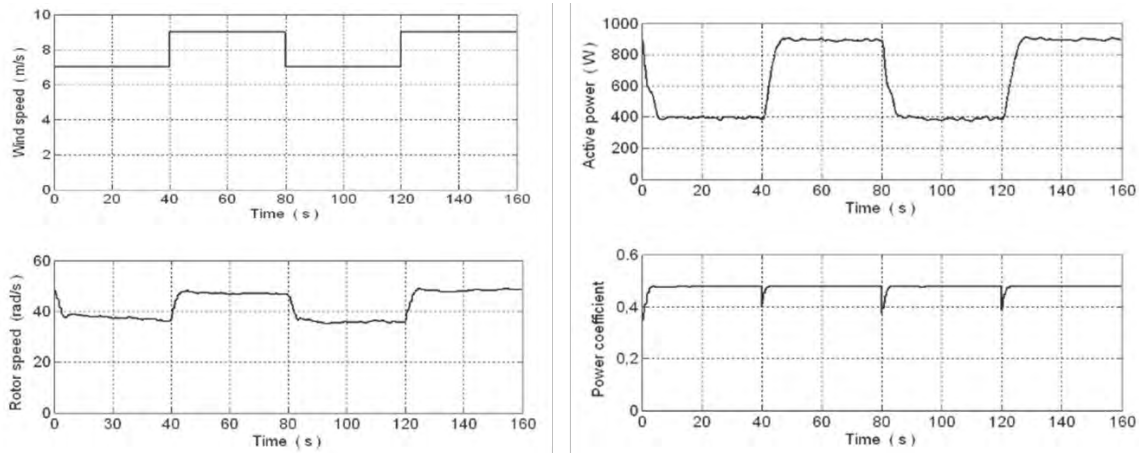


Figura 2.6: Turbina con un perfil de velocidad del viento escalonado [25].

En la figura 2.6 se presenta una prueba de extracción de potencia en una turbina eólica, utilizando una variación escalonada de la velocidad del viento. Se observa cómo la potencia activa generada varía en función de los cambios en la velocidad del viento, controlada mediante la técnica del Tip Speed Ratio (TSR).

En el trabajo [26] se describe un sistema compuesto por un rotor hidrocínético, un generador de imanes permanentes, etapas de electrónica de potencia y un microcontrolador encargado de regular la producción de energía. Este sistema se complementa con una estrategia de control diseñada para maximizar la generación eléctrica, adaptándose a las variaciones en la velocidad del agua. El método de control se fundamenta en tres zonas de operación definidas por la frecuencia eléctrica generada, estableciéndose distintos valores de consigna para la corriente continua en cada una de ellas. El sistema se activa en una etapa de potencia del convertidor elevador, utilizando un control de corriente máxima con un tiempo de desconexión fijo en el interruptor de potencia. Asimismo, el control de la velocidad del agua puede operar de forma continua o discontinua, dependiendo de los requerimientos de corriente. La validez de esta estrategia de control ha sido comprobada mediante simulaciones dinámicas.

La estrategia de control que se propone en tres zonas de operación definidas:

La estrategia de control la definen a través de las ecuaciones y en función de la frecuencia eléctrica medida, dividiéndose en tres regiones de operación (ver figura 2.7): Región CUT-IN, Región MPPT y Región de máxima potencia.

- Región CUT-IN: En esta zona, la velocidad del agua es inferior a la velocidad mínima necesaria para el funcionamiento del rotor ($0 < v < v_{min}$). El rango de velocidad se corresponde con el intervalo de frecuencia $0 < F_e < F_{e_CUT-IN}$ sin carga.
- En la Región CUT-IN, la frecuencia F_{e_CUT-IN} sin carga se calcula utilizando los valores de la velocidad mínima de operación (v_{min}) y la relación de velocidad de punta (Tip Speed Ratio) correspondiente a la condición sin carga. En esta etapa, el módulo no está conectado al bus de energía.
- En la Región MPPT, la velocidad del agua se encuentra dentro del rango de operación entre v_{min} y la velocidad nominal (v_n), lo que corresponde a un intervalo de frecuencias entre F_{e_CUT-IN} MPP y $F_{e_CUT-OUT}$ MPP. Estas frecuencias se determinan usando los valores de v_{min} y v_n , junto con la relación de velocidad de punta en condiciones de máxima potencia. Durante esta fase, el módulo genera energía eléctrica al controlar la corriente continua (IDC) en el punto de máxima potencia (I_{mpp}).

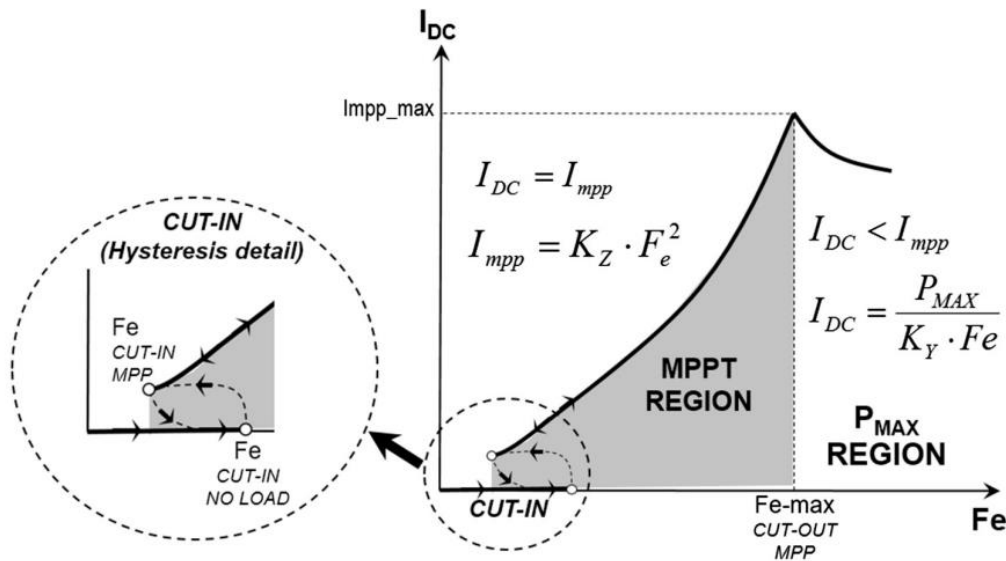


Figura 2.7: Diagrama de la estrategia de control (frecuencia eléctrica) [26].

En la Región de máxima potencia, la velocidad del agua supera la velocidad nominal (v_n), lo que se refleja en un rango de frecuencias superior a $F_{e_CUT-OUT}$ MPP. En este caso, el sistema sigue operando en el punto de máxima potencia, pero limita la generación de energía eléctrica al valor máximo definido en el diseño. El módulo controla la corriente IDC para mantener la potencia eléctrica en su nivel máximo permitido.

Este artículo [27] Este trabajo ofrece una revisión de dos métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) empleados para maximizar la extracción de energía en sistemas de conversión eólica basados en generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG). Los métodos analizados son el control mediante la relación de velocidad de punta (TSR) y el control por búsqueda de ascenso (HCS). El control del DFIG se implementa a través de una técnica de control directo de potencia, diseñada para la generación eólica con velocidad variable. El sistema descrito en este estudio ha sido desarrollado y probado en el entorno MATLAB/Simulink, y los resultados de las simulaciones confirman la eficacia y el rendimiento de los métodos de control propuestos.

2.2.4 Conclusiones de la revisión del estado del arte.

En relación con los trabajos revisados, se realizó un análisis de diversos sistemas de cosecha de energía tanto hidrocínética como eólica (por falta de trabajos sobre el tema), donde se utilizaron diferentes softwares para evaluar el comportamiento de distintos métodos de MPPT. Aunque los estudios revisados abordan sistemas de cosecha de energía distintos (hidrocinéticos y eólicos), resultaron altamente relevantes para este trabajo, ya que proporcionaron las bases para replicar un sistema completo de banco de pruebas para el estudio comparativo y permitieron consolidar un entendimiento sólido sobre el comportamiento de las técnicas MPPT en estos sistemas. Además, siguiendo la metodología expuesta en los trabajos revisados, se implementaron algunos de sus enfoques con el fin de verificar y validar los resultados obtenidos tanto en los estudios previos como en esta tesis.

2.2.4.1 Algoritmos MPPT seleccionados para su estudio comparativo

En contexto de un sistema de cosecha de energía en un canal de riego con posible aplicación en zonas rurales, donde los recursos son limitados y la necesidad de recurso eléctrico es esencial, se debe considerar una implementación sencilla, económica, confiable y de baja demanda computacional. En la revisión bibliográfica se identificaron tres algoritmos que destacan por su efectividad e implementación en una turbina y con puntos antes mencionados. Estos algoritmos son Perturbar y Observar (P&O), Conductancia Incremental (IC) y la técnica conocida como pre-alimentación (en inglés; Feedforward) o Cuasi MPPT. Como se observó en trabajos de sistema eólicos y otros de hidráulica, obtienen la potencia eléctrica a partir de la medición velocidad del fluido, revoluciones, frecuencia eléctrica, Tip Speed Ratio, Par óptimo, tensión entre otras.

En este trabajo se clasifican en dos principales categorías de métodos, no sólo en términos de técnica, sino también de enfoque: aquellos que se basan en un profundo conocimiento de la turbina y su entorno (conocidos como cuasi MPPT o Feedforward), y los que operan de forma continua sin necesidad de información específica sobre la turbina (como los métodos P&O e INC). En el primer grupo, mediante el empleo de ecuaciones que describen la planta (turbina-PMG), es posible alcanzar o aproximarse al punto de máxima potencia, aprovechando el conocimiento previo de la turbina y PMG. En contraposición, el segundo grupo opera de manera continua, sin requerir un conocimiento detallado de la turbina (P&O, IC). Es importante destacar que cada una de estas categorías engloba una serie de métodos, los cuales varían en función del tipo de sensor utilizado y otros parámetros específicos.

Respecto a lo analizado en la revisión bibliográfica, se resaltan las características y resultados clave de estos tres métodos seleccionados, destacando su relevancia y efectividad en la búsqueda del punto de máxima potencia (MPP) en sistemas de generación de energía utilizando turbinas como se puede ver tabla resumen de comparación (ver figura 2.1).

Método	Ventajas	Desventajas
Algoritmo; Perturbar y Observar (P&O)	Es uno de los algoritmos MPPT más simples y ampliamente utilizados. Fácil de implementar y no requiere cálculos complejos. Adecuado para sistemas con recursos limitados.	Puede presentar problemas de oscilación en MPP No es tan preciso como otras técnicas más sofisticadas. Puede tener dificultades en situaciones de cambios rápidos en las condiciones de operación.
Algoritmo; Conductancia Incremental (IC)	Es una técnica popular y efectiva para el seguimiento del punto de máxima potencia. Relativamente simple de implementar. Es rápido al encontrar el MPP. Menos oscilaciones al encontrar el MPP, su precisión es buena.	Rendimiento en condiciones extremas: Si bien el algoritmo funciona bien en condiciones moderadamente variables, puede tener dificultades para seguir el MPP en situaciones de cambios extremos en la velocidad del fluido, lo que afectaría su rendimiento en esos casos.
Técnica; Cuasi MPPT	Es una opción adecuada para sistemas con restricciones de recursos y no requiere cálculos complejos. Siempre y cuando la planta no tenga desgaste significativo siempre estará en MPP. Relativamente más sencillo que otros métodos.	Puede no ser adecuado para aplicaciones que requieran un seguimiento muy preciso del MPPT a través del tiempo. Mayor mantenimiento preventivo. Limitaciones en su capacidad para adaptarse a cambios rápidos en las condiciones de operación.

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas entre técnicas MPPT.

En la tabla 2.1 se presentan algunas ventajas y desventajas de manera resumen de los métodos MPPT que se tuvieron en cuenta en relación a la literatura. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las conclusiones extraídas de esta revisión bibliográfica fueron respaldadas de manera más sólida con el estudio comparativo mediante el uso del software LTSpice. Este enfoque permitió corroborar la veracidad de los resultados y validar las conclusiones obtenidas. Además, es importante mencionar que algunas de las conclusiones planteadas en esta revisión están basadas en sistemas eólicos (por falta de trabajos relacionados al tema), por lo que también se consideraron necesarios para analizar su aplicabilidad en el contexto de las turbinas hidrocínicas.

Capítulo 3 Desarrollo y Resultados

3 Desarrollo y resultados

3.1 Metodología para el banco de pruebas

La metodología empleada en este estudio ha sido cuidadosamente diseñada para asegurar el cumplimiento de los objetivos de investigación establecidos. Para comparar de manera efectiva las estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en microturbinas hidrocinéticas, se ha desarrollado un enfoque integral que abarca desde la planificación experimental hasta la evaluación detallada de los resultados obtenidos.

En esta sección se describe el proceso metodológico seguido, resaltando la importancia de cada etapa en el logro de los objetivos del estudio. Se pone especial énfasis en la selección y justificación de las herramientas y técnicas empleadas, tales como los modelos de simulación y los algoritmos de MPPT, así como en los procedimientos de análisis de datos que permitirán extraer conclusiones significativas y rigurosas.

La metodología incluye la modelización teórica del sistema, la simulación de las estrategias MPPT en un entorno controlado, y la validación de los resultados mediante comparaciones con datos experimentales o simulaciones avanzadas. Cada uno de estos pasos es fundamental para garantizar la fiabilidad y validez de los hallazgos de la investigación, proporcionando una base sólida para futuras aplicaciones y desarrollos en el campo de la energía hidrocinética.

3.1.1 Descripción del sistema para hacer MPPT.

En la Figura 3.1 se presenta una representación en bloques del sistema, donde se destacan componentes clave como las mediciones directas realizadas por sensores encargados de medir variables críticas, tales como la velocidad del fluido o las revoluciones por minuto en el acoplamiento turbina-generator. Otra opción es medir la frecuencia eléctrica de salida del generador síncrono de imanes permanentes (PMG). Estas mediciones son fundamentales para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

En otro bloque destacado en la Figura 3.1, se muestra una entidad que funciona como una "caja negra" en la cual se puede aplicar una técnica (como cuasi-MPPT o Feedforward) o un algoritmo de MPPT (como Perturbar y Observar o Conductancia Incremental). Simultáneamente, se utiliza una fuente de corriente controlada (dentro del recuadro punteado en color rojo) para gestionar la etapa de la electrónica de potencia, suministrando energía a una batería o a un bus de corriente continua. Este enfoque integral permite una gestión eficiente de la potencia generada, contribuyendo a la optimización continua del sistema.

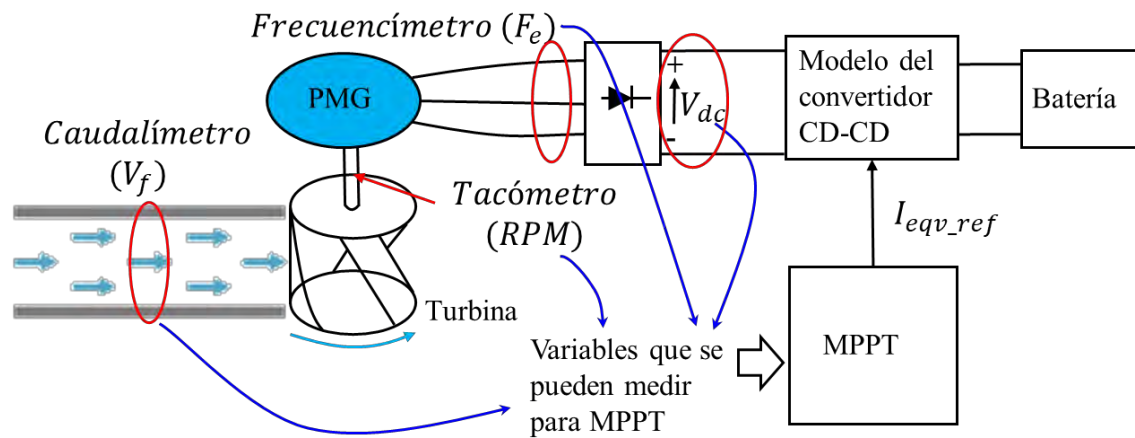


Figura 3.1: Diagrama del sistema bajo estudio.

Las técnicas o algoritmos propuestos tienen como objetivo determinar una corriente de referencia que será entregada al convertidor electrónico. Esta corriente, en combinación con la estimación de la tensión de salida del rectificador, permite calcular la potencia extraíble del sistema. El algoritmo o técnica MPPT ajusta dinámicamente esta corriente de referencia según las diversas condiciones establecidas en la máquina de estados, asegurando así una operación óptima del sistema.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de entrada para el modelado del sistema, ya que se seleccionó una turbina patrón de eje horizontal, con un modelo del PMG Básico para su estudio, también se presentan valores como lo son la densidad del fluido.

Turbina	Valor	Unidad
Radio de la turbina	0.3	Metros (m)
Altura	0.5	Metros (m)
Cp_opt	0.5	Adimensional
TSR_opt	5	Adimensional
TSR_Vacio	10	Adimensional
Cut_in	0.2	m/s
TSR_min	2	Adimensional
Generador de Imanes Permanentes (PMG)	Valor	Unidad
Pares de polos	6	Adimensional
Coeficiente de voltaje – velocidad del PMG	100	(V/krpm)
Momento de inercia	0.1	Kg/m ²
f_m es el coeficiente de fricción del motor	10	μ Faradios
Fluido	Valor	Unidad
Densidad del agua	995	(Kg/m ²)

Tabla 3.1: Parámetros de entrada del sistema en simulación.

3.1.2 Explicación del sistema implementado en LTSpice

Para comprender adecuadamente la construcción del banco de pruebas, es esencial conocer los procesos de verificación de funcionamiento, así como los ajustes realizados para mejorar su funcionalidad en el software, lo cual es crucial para alcanzar el objetivo general de esta tesis: la comparación de las estrategias MPPT.

Cabe destacar que el tipo de letra utilizado en la Figura 3.2 es el predeterminado por el software LTSpice.

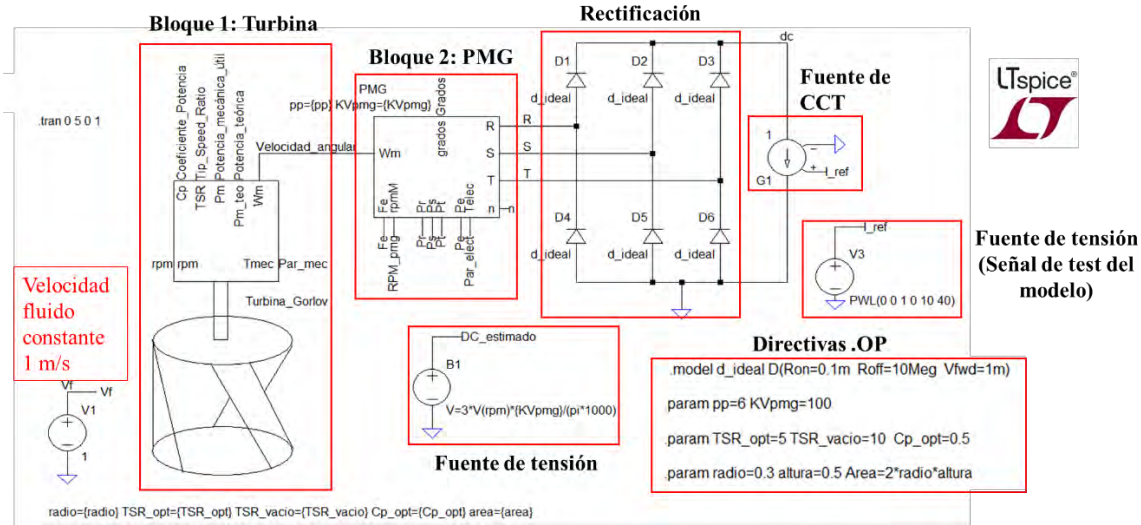


Figura 3.2: Sistema implementado en LTSpice.

En la Figura 3.2 se detallan los distintos bloques que componen el banco de pruebas en LTSpice, diseñado para la validación de las técnicas y algoritmos de MPPT.

Bloque 1: Turbina Hidrocíntrica

Este bloque representa la turbina hidrocíntrica, con una entrada que simula la velocidad del fluido. Las salidas clave incluyen las revoluciones por minuto (RPM), el coeficiente de potencia (indicador del rendimiento de la turbina), y el Tip Speed Ratio (TSR), una métrica fundamental que compara la velocidad tangencial de la punta de la turbina con la velocidad del fluido incidente. Mantener el TSR dentro de un rango óptimo es esencial para maximizar la eficiencia del sistema, ya que un TSR adecuado garantiza que la turbina opere cerca de su punto de máxima eficiencia. Además, el bloque genera la salida del par mecánico y la potencia teórica, la cual, al multiplicarse por el coeficiente de potencia, proporciona la potencia generada por el sistema.

Bloque 2: Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMG) y Etapa de Rectificación. Este bloque, acoplado al Bloque 1 mediante la velocidad angular, modela el generador síncrono de imanes permanentes (PMG) y la etapa de rectificación. Las salidas de este bloque incluyen la frecuencia eléctrica, las RPM, la potencia eléctrica, y las tensiones que se conectan a la etapa de rectificación. Esta etapa proporciona una tensión rectificada

que alimenta al bloque del convertidor CD-CD, actuando como la etapa de electrónica de potencia. El convertidor recibe una corriente de referencia determinada por la técnica o algoritmo MPPT implementado. Para analizar el comportamiento del sistema en simulación, se ha introducido una señal tipo rampa como referencia, así como una velocidad constante del fluido de 1 m/s, con el fin de evaluar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones. Esta velocidad de 1 m/s es solo una prueba inicial de funcionamiento; posteriormente, se sustituirá por una señal de prueba más compleja.

Directivas OP (.param). Las directivas OP (.param) en esta sección son fundamentales para definir parámetros específicos del sistema, como polos, ganancias, KV del generador, TSR óptimo, TSR en vacío, coeficiente de potencia óptimo, y dimensiones de la turbina, entre otros, como se detalló en la Tabla 3.1. Estas directivas garantizan la precisión y la fidelidad del modelo utilizado en la simulación del sistema completo, permitiendo un análisis exhaustivo y confiable de su comportamiento.

3.1.2.1 Caracterización de la turbina en LTSpice

Siguiendo la Figura 3.2 y en consonancia con los bloques que componen el sistema, es esencial caracterizar una turbina de referencia que se utilizará en todas las simulaciones de los algoritmos MPPT. Como parte integral del bloque de la turbina empleado en estas pruebas, se explicará a continuación el desarrollo y la implementación de dicha turbina en el software LTSpice.

3.1.2.2 Ecuaciones para la caracterización de turbina

Debido a que el principio de funcionamiento y el comportamiento físico de las turbinas hidrocínéticas es igual al de las turbinas eólicas [28]. Se pueden considerar las siguientes fórmulas para explicar el modelo matemático de las turbinas hidrocínéticas [19].

Para saber la máxima potencia que podemos extraer en campo abierto, tenemos la siguiente ecuación

$$P_{f_max} = \frac{1}{2} \cdot C_{p_{opt}} \cdot \rho \cdot A_{tur} \cdot v^3 \quad (1);$$

Donde:

$C_{p_{opt}}$ es el coeficiente de potencia en MPP.

ρ es la densidad del fluido.

A_{tur} es el área de la turbina.

v^3 la velocidad del fluido.

Para determinar la velocidad, es necesario calcular la relación de velocidad en la punta de la pala, conocida como Tip Speed Ratio (TSR). Este valor permite evaluar las condiciones de arranque de la turbina, asegurando que opere de manera eficiente desde el inicio.

$$TSR = \frac{\omega \cdot R_{tur}}{v_f} \quad (2);$$

Donde:

ω es la velocidad angular.

R_{tur} es el radio de la turbina.

v_f es la velocidad del fluido.

Por otro lado, las revoluciones por minuto (RPM) también pueden indicar el estado de arranque de la turbina. A partir de las RPM, es posible calcular la velocidad de giro del PMG (o del eje de la turbina), proporcionando información crucial sobre el rendimiento inicial del sistema.

$$rpm = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} \quad (3);$$

Donde:

ω es la velocidad angular.

El coeficiente de potencia (C_p) es una característica de la turbina que se determina mediante ensayos experimentales. Sin embargo, para simular el modelo de la turbina, es necesario conocer las ganancias K1 y K2. Los valores del TSR en vacío y óptimos se encuentran en la Tabla 3.1, donde se han definido los parámetros iniciales de la turbina.

$$K2 = \frac{TSR_{vacio} * TSR_{opt}}{TSR_{vacio} - TSR_{opt}} \quad (4);$$

$$K1 = \frac{Cp_{opt}}{\left(\frac{TSR_{vacio}}{TSR_{opt} - 1}\right) \cdot e^{\left(-\frac{K2}{TSR_{opt}}\right)}} \quad (5);$$

$$Cp = (K1) \cdot \left(\frac{TSR_{vacio}}{TSR} - 1\right) \cdot e^{\left(-\frac{K2}{TSR}\right)} \quad (6);$$

Otra de la variables de salida de la turbina es la potencia mecánica (Pm):

$$Pm = Cp \cdot Pm_{teo} \quad (7);$$

Donde:

Cp es el coeficiente de potencia

Pm_{teo} es la potencia mecánica teórica

El par mecánico se puede saber con la siguiente ecuación ($Tmec$):

$$Tmec = \frac{Pm}{\omega_m} \quad (8);$$

Donde:

Pm es la potencia mecánica

ω_m es la velocidad angular del motor

3.1.2.3 Bloque de turbina en LTSpice

Para comprender el modelo de la turbina de referencia que estamos utilizando en esta investigación, es necesario analizar la Figura 3.3, donde se muestran los componentes que

conforman la turbina, junto con las ecuaciones que hemos presentado y explicado en la sección anterior.

Además, se pone especial atención en la importancia de incorporar un par de arranque (destacado en la Figura 3.3 en la sección sombreada en rojo) en la fase de acoplamiento con el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMG). Este parámetro adicional es crucial para la correcta selección y ajuste del acoplamiento, garantizando una integración eficiente entre la turbina y el PMG.

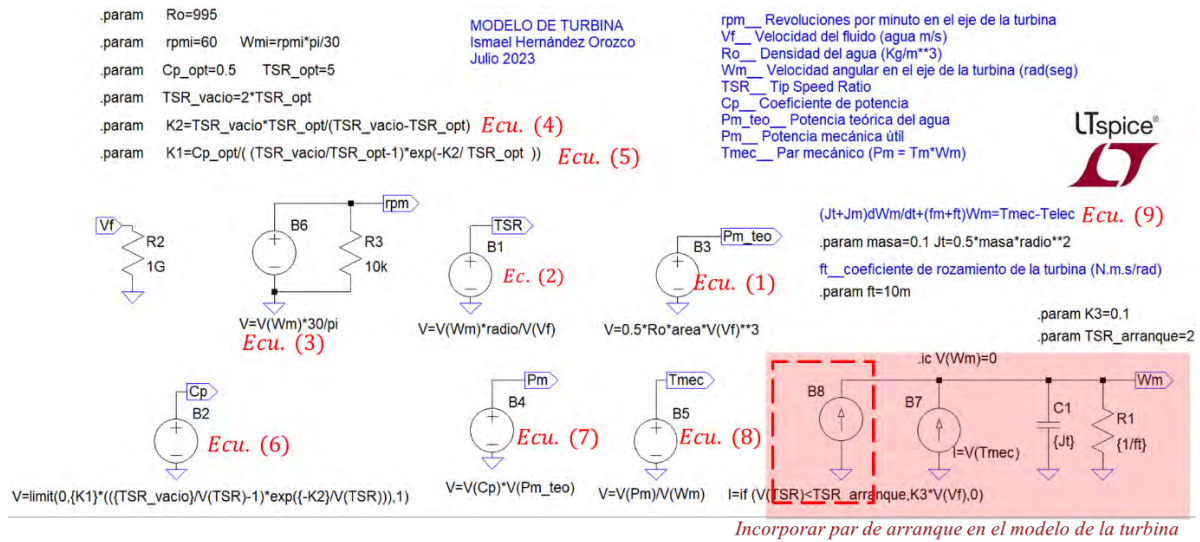


Figura 3.3: Bloque de la turbina.

3.1.2.4 Generador de imanes permanentes.

Para explicar el modelo básico del PMG, es necesario seguir un enfoque similar al utilizado con el bloque de la turbina. Por esta razón, es fundamental definir sus ecuaciones de comportamiento, lo que permitirá realizar un acoplamiento adecuado con la turbina.

En la ecuación (9), que se presenta a continuación, se aborda el acoplamiento entre la turbina y el PMG. En esta ecuación se consideran elementos como los discos de inercia, el coeficiente de fricción, los pares mecánico y eléctrico. Esta ecuación establece la conexión entre el bloque uno y el bloque dos de la Figura 3.2.

$$(J_t + J_m) \left(\frac{d\omega_m}{dt} \right) + (f_m + f_t) \omega_m = T_{mec} - T_{elec} \quad (9);$$

Donde:

J_t es la inercia total de la carga.

J_m es la inercia del motor.

$\frac{d\omega_m}{dt}$ es la derivada de la velocidad angular del motor con respecto al tiempo.

f_m es el coeficiente de fricción del motor.

f_t es el coeficiente de fricción de la carga.

ω_m es la velocidad angular del motor.

T_{mec} es el torque mecánico aplicado al motor.

T_{elec} es el torque eléctrico generado por el motor.

Entonces la ecuación (9) se podría ver de esta manera a manera de bloques para realizar el acoplamiento de la turbina con el PMG.

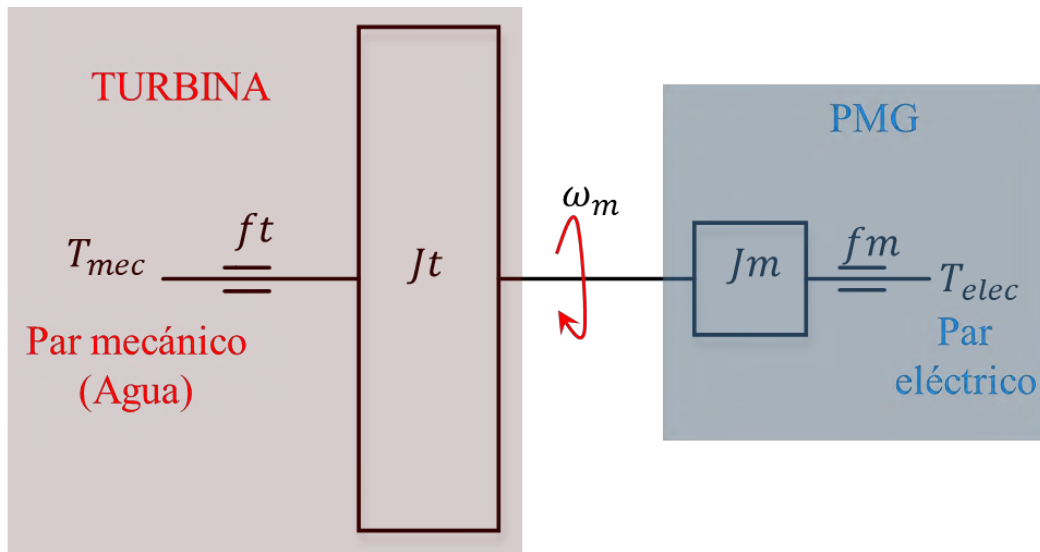


Figura 3.4: Modelo del conjunto turbina-PMG.

Es importante recordar que el modelo propuesto para la comparación de algoritmos MPPT (creación de banco de pruebas) es un sistema mecánico simulado en un software de simulación electrónica (LTSpice). Por ello, partiendo de la ecuación (9) y la Figura 3.4, se establece una analogía entre los componentes electrónicos y mecánicos.

Entonces podremos definir;

Par (T) = corriente (I)

Velocidad angular (ω) = tensión (V)

Momento de inercia (J) = capacidad (C)

Rozamiento ($1/f$) = resistencia (R)

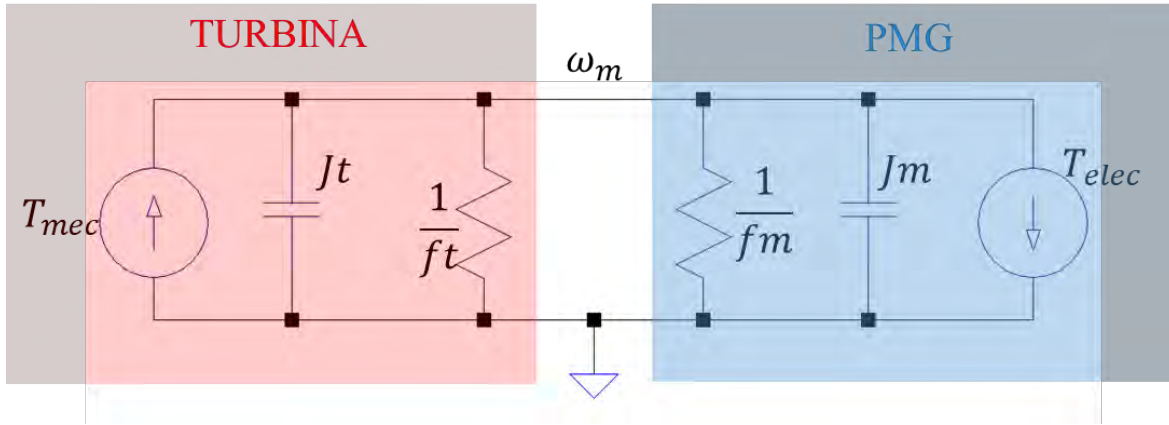


Figura 3.5: Modelo eléctrico del acoplamiento turbina-PMG.

Como dato extra en el modelo del PMG podemos calcular la posición del rotor:

$$\theta_{rad} = 0.2 \cdot \pi \quad (10);$$

$$Grados = \theta_{rad} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (11);$$

Es fundamental conocer la frecuencia eléctrica del generador, ya que este valor se puede utilizar para medir la potencia del sistema. Esto lo convierte en una de las posibles variables para la implementación de alguna técnica o algoritmo MPPT. Para ello, se puede emplear la siguiente ecuación:

$$Fe = 0.5 \cdot \omega_m \cdot \frac{pp}{\pi} \quad (12);$$

Para poder conocer el valor de la tensión máxima de alterna entre fases a la salida del PMG, utilizamos la siguiente ecuación:

$$V_{ff_max} = \frac{rpm \cdot KV}{1000} \quad (13);$$

Donde:

$rpm = \text{revoluciones por minuto}$

$KV = \text{coeficiente de voltaje}$

Por otra parte, también se puede estimar el valor de la tensión máxima de alterna entre fase y neutro a la salida del PMG, esto como dato extra del modelo:

$$V_{fn_max} = \frac{V_{ff_max}}{\sqrt{3}} \quad (14);$$

El control de la energía se requiere en corriente continua, y nuestro sistema proporciona una tensión rectificada con un rizado que no es conveniente para trabajar de esa manera. Para evitar la necesidad de un filtro, se puede estimar la tensión de salida, lo que nos permite evitar inconsistencias en las simulaciones debido al rizado.

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{rpm \cdot KV}{1000} \quad (15);$$

3.1.2.5 Caracterización del PMG en LTSpice

En esta sección se presenta el modelo de un generador en LTSpice, que incluye sus ecuaciones correspondientes, así como un área específica destinada al acoplamiento con la turbina, destacada en el recuadro azul que se muestra en la Figura 3.6. El acoplamiento de estos dos bloques es crucial para el funcionamiento de nuestro sistema. Al lograr un acoplamiento adecuado, se garantiza la capacidad de extraer potencia eléctrica a partir del movimiento mecánico, siempre y cuando se respeten las condiciones de arranque de la turbina.

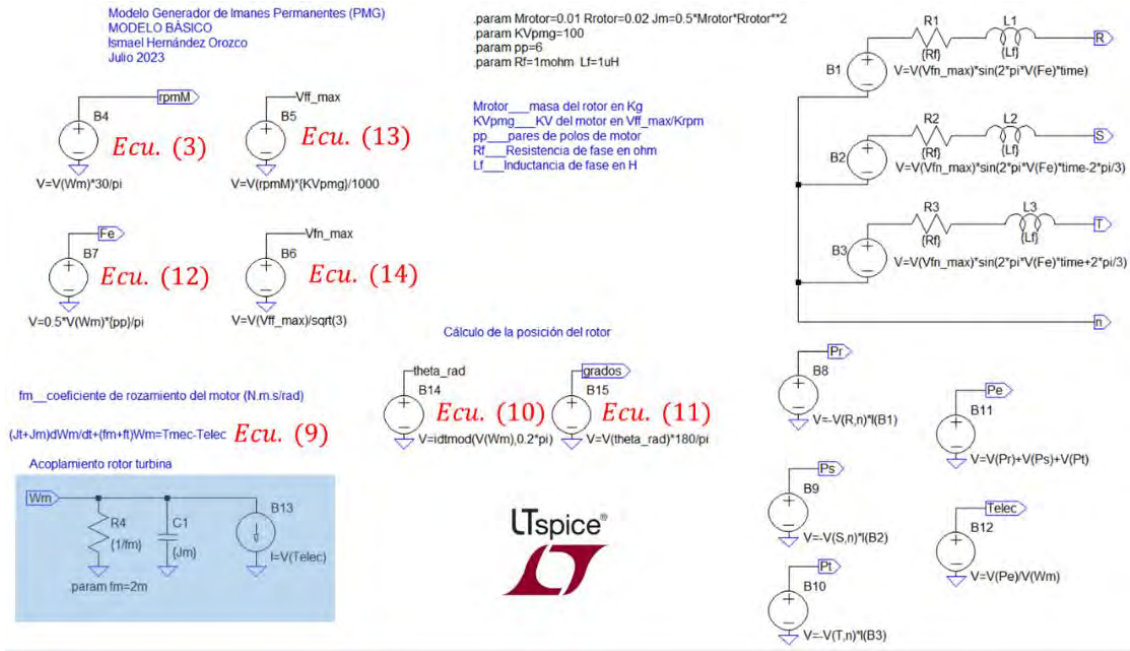


Figura 3.6: Bloque del generador eléctrico (PMG).

Una vez explicados los bloques de la turbina y el PMG, y como se observó en la Figura 3.2, se puede proceder a realizar una simulación para corroborar el correcto funcionamiento del sistema. Esto permitirá definir el banco de pruebas final que se utilizará para la verificación de las técnicas y algoritmos MPPT seleccionados previamente en el estado del arte, los cuales se aplicarán en este banco de pruebas.

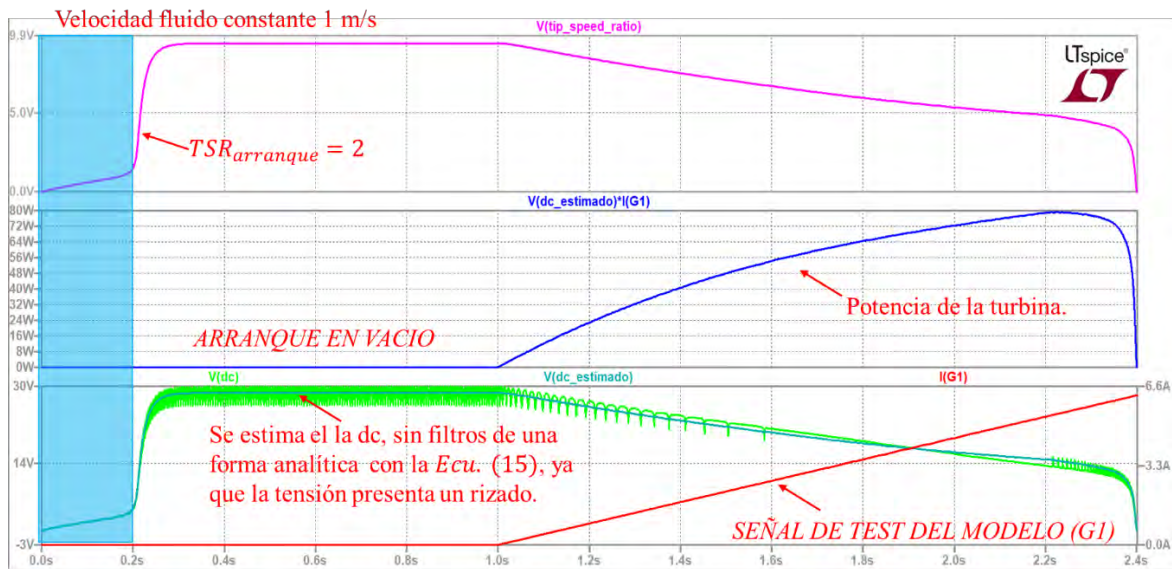


Figura 3.7: Simulación en LTSpice con velocidad del fluido constante.

Explicación de la Figura 3.7; se muestra la simulación del sistema, que incluye tres gráficas representativas. La primera gráfica muestra el Tip Speed Ratio (TSR), que indica el arranque de la turbina y su transición al TSR de vacío. A medida que se extrae potencia, el TSR tiende a decrementar, y en el punto de máxima potencia extraíble, el TSR se aproxima al valor óptimo, que en este caso es cinco. La segunda gráfica presenta la potencia eléctrica (W), que se muestra en azul. En esta gráfica, se observa cómo el TSR disminuye cuando se extrae potencia.

La tercera gráfica ilustra la tensión de salida de la etapa de rectificación, donde se puede notar un ligero rizado. Para abordar esto, se estima el promedio de la tensión de salida del sistema. Además, se observa una señal de prueba del modelo, que se utiliza para la extracción de corriente del sistema (G1). El producto de esta señal de corriente y la tensión estimada nos proporciona la potencia eléctrica del sistema, que se muestra en la gráfica en azul. Cabe destacar que esta prueba se realizó con una velocidad de fluido constante de 1 m/s.

En las simulaciones presentadas en la Figura 3.7 y en las siguientes, las unidades se muestran en términos de "Voltaje". Esto se debe a que el software utilizado para el modelado y simulación de circuitos eléctricos permite medir varias variables, ya sea individualmente o en combinación. Las variables consideradas incluyen corriente (I), voltaje (V) y potencia (W). Para identificar claramente lo que se está midiendo, se etiquetan las variables en el circuito con nombres específicos, como en nuestro caso: Tip_Speed_Ratio, Coeficiente_de_Potencia, entre otros.

3.1.2.6 Banco de pruebas para pruebas

En la Figura 3.8 se presenta el banco de pruebas utilizado para la comparación de técnicas MPPT. Este banco se configura de manera similar al mostrado en la Figura 3.2, pero con algunas diferencias notables. En la nueva configuración, la etapa de rectificación se incluye junto con el PMG en un único bloque, y se añade un bloque específico donde se aplicará la técnica o algoritmo MPPT. Además, el modelo incorpora un convertidor CD-CD y una batería que realiza la etapa de almacenamiento de energía.

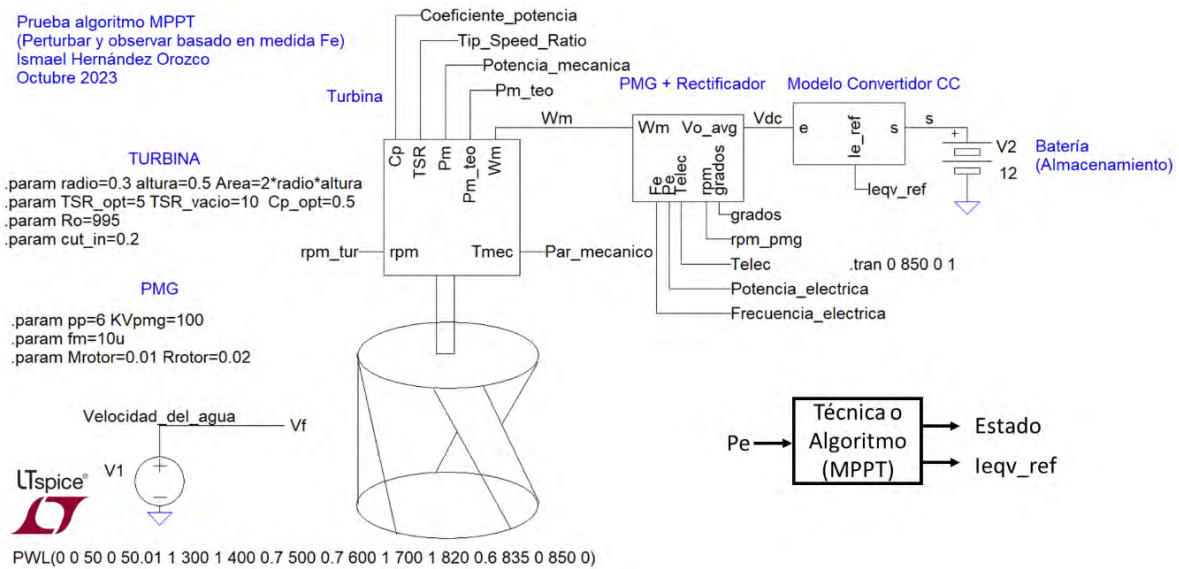


Figura 3.8: Banco de pruebas para pruebas de MPPT.

3.1.3 Desarrollo de Técnicas y algoritmos MPPT

Para determinar si el sistema se aproxima o se aleja del punto de máxima potencia (MPP), se han desarrollado diversas alternativas que se implementan en diferentes técnicas y algoritmos. Estas alternativas pueden requerir la medición directa de variables específicas mediante sensores, como frecuencímetro, tacómetro, caudalímetro, voltímetro, entre otros, para evaluar la potencia extraída. En este trabajo, el enfoque se centra exclusivamente en el estudio de los sensores mencionados anteriormente, con el objetivo de identificar las formas más efectivas de encontrar y mantener el MPP en el sistema.

3.1.3.1 Señal de pruebas

Es fundamental incorporar una señal de prueba que actúe como la velocidad de flujo de referencia en todas las simulaciones realizadas. Esta señal se utiliza para someter al sistema a diversas pruebas con técnicas o algoritmos MPPT. En este caso, la señal de prueba se configura como un escalón, un escenario no necesariamente realista desde el punto de vista físico, pero altamente funcional para nuestros propósitos experimentales. Este enfoque permite simular cambios extremos en el flujo, lo que facilita una observación detallada de la respuesta de cada técnica o algoritmo ante variaciones abruptas en la velocidad del fluido, tal y como se observó en el trabajo [25].

1. Arranque en escalón desde cero hasta 1 m/s
2. Reducción de velocidad en desde 1 m/s hasta 0.7 m/s
3. Aumento de velocidad desde 0.7 m/s hasta 1 m/s
4. Parada desde 1 m/s hasta cero

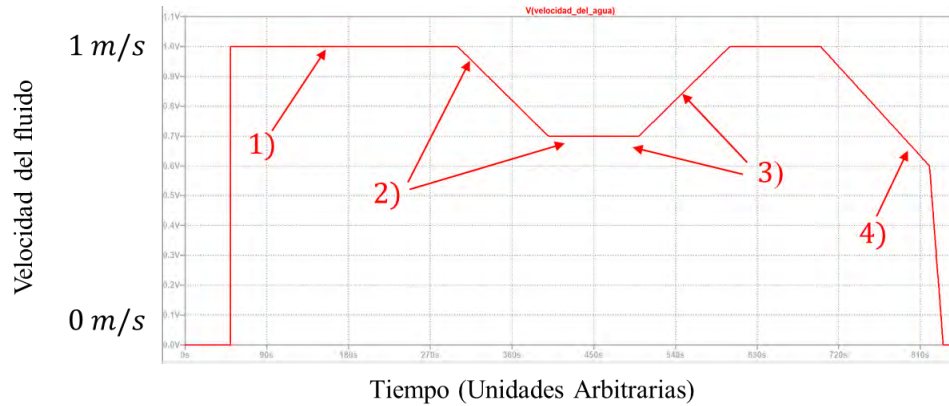


Figura 3.9: Señal de test para todas las simulaciones.

3.1.3.2 Técnica MPPT midiendo la velocidad del fluido.

Para esta alternativa, se emplean dos sensores para capturar datos clave relacionados con las características del flujo, con el objetivo de identificar el punto de máxima potencia (MPP). El primer sensor, un caudalímetro, mide la velocidad del fluido, proporcionando información esencial sobre la dinámica del agua en el entorno de la microturbina. El segundo sensor se utiliza para medir la relación de velocidad en la punta de la pala, conocida como Tip Speed Ratio (TSR), con el fin de determinar si la turbina ha iniciado su funcionamiento. Una vez que se verifica el arranque de la turbina, se puede proceder a la extracción de la corriente de referencia (I_{ref}).

La Figura 3.10 muestra la máquina de estados, donde el diagrama de flujo se relaciona con la curva característica de potencia de la turbina. Esta representación permite describir analíticamente el proceso de búsqueda del MPP mediante la medición de la velocidad del fluido. La explicación detallada comienza en estado 0, que se caracteriza por la transición de parado a condiciones óptimas de operación de la turbina, en consecuencia, la determinación de una corriente de referencia en el estado 1.

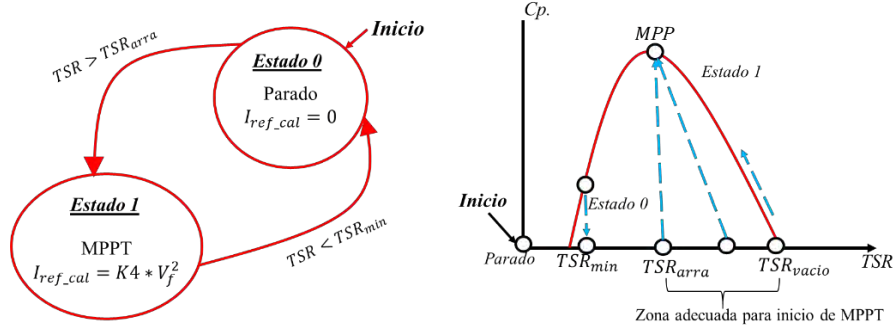


Figura 3.10: Máquina de estados de forma analítica para V_f .

La dinámica de la máquina de estados cambia cuando se detecta que el TSR medido supera el valor del TSR de arranque. En este caso, la máquina de estados transita al estado 1, que corresponde a la zona del MPP. En este estado, la corriente de referencia se calcula como el producto de una ganancia y el cuadrado de la velocidad del fluido. Por otro lado, si el TSR es inferior al valor mínimo requerido, la máquina de estados regresa al estado 0.

3.1.3.2.1 Ecuaciones para la técnica cuasi MPPT midiendo velocidad del fluido

Recordando la figura 4.2 en la descripción del sistema se hace mención sobre la extracción de potencia eléctrica con la corriente de referencia que entrega la técnica y la tensión estimada.

$$Pot_e = V_{dc} \cdot I_{eqv} \quad (16);$$

Donde:

V_{dc} = Tensión estimada del sistema

I_{eqv} = Corriente equivalente de la técnica MPPT

Se requiere una expresión analítica para la corriente que debemos demandar en cada momento, para la técnica de cuasi MPPT midiendo la velocidad del fluido.

$$I_{eqv_cal} = K4 \cdot V_f^2 \quad (17);$$

$$K4 = \frac{\pi \cdot 1000 \cdot R \cdot Cp_{opt} \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot 3 \cdot 30 \cdot KV \cdot TSR_{opt}} \quad (18);$$

Donde:

$V_f = \text{Velocidad del fluido}$

$\rho = \text{Densidad del fluido (en este caso agua)}$

$A = \text{área}$

$KV = \text{coeficiente de voltaje}$

$R = \text{radio}$

$Cp_{opt} = \text{Coeficiente de potencia óptimo}$

$TSR_{opt} = \text{Tip Speed Ratio óptimo}$

La corriente equivalente de referencia de la técnica en cuestión despreciando pérdidas, la podemos definir con la siguiente expresión:

$$I_{eqv_ref} = \frac{P_{f_max}}{V_{dc}} \quad (19);$$

Donde;

$P_{f_max} = \text{Potencia máxima extraíble}$

$V_{dc} = \text{Tensión estimada del sistema}$

En la Figura 3.11 se presenta la implementación de la técnica MPPT en LTSpice, donde se observa un bloque con dos entradas principales: el Tip Speed Ratio (TSR) y la velocidad del fluido. Estas entradas son cruciales para calcular la corriente de referencia, la cual es utilizada para determinar el estado actual de la máquina de estados, destacado en el recuadro rojo (máquina de estados previamente explicada en la Figura 3.10). Este bloque, actualmente operativo, genera una corriente de referencia que es transmitida a la etapa de electrónica de potencia para su posterior procesamiento y aplicación en la regulación del sistema. Este enfoque técnico en LTSpice ofrece una representación tanto visual como funcional de la técnica de control MPPT, destacando la importancia de medir la velocidad del fluido y el Tip Speed Ratio en el contexto del sistema de generación de energía hidrocínética.

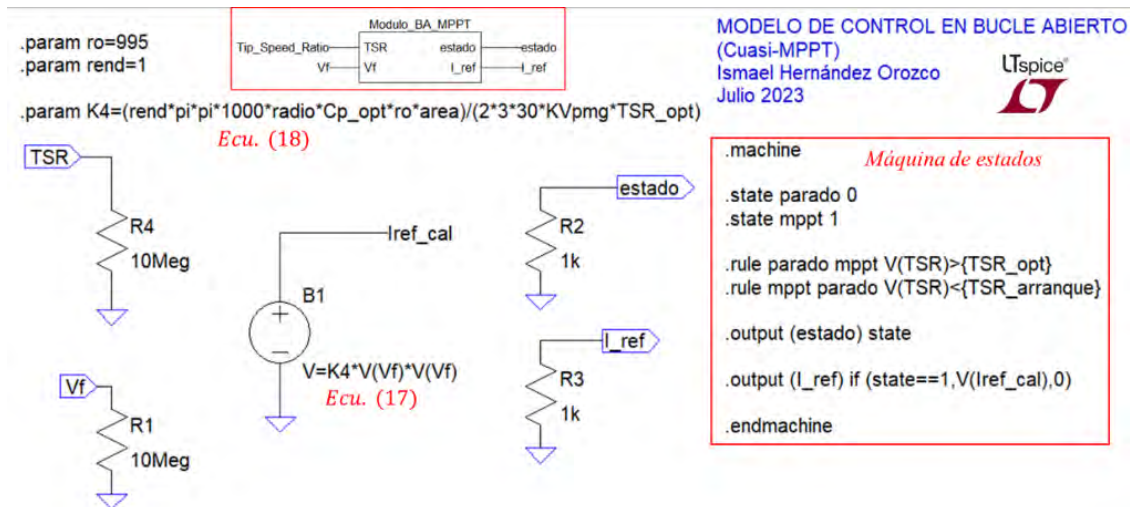


Figura 3.11: Bloque de cuasi-MPPT para medir la velocidad del fluido y TSR.

3.1.4 Técnica MPPT con relación a las revoluciones por minuto.

En relación con la técnica previamente descrita, se plantea una alternativa que consiste en medir las revoluciones por minuto (RPM) en el acoplamiento entre la turbina y el generador. Al monitorear la velocidad angular del eje de la turbina o del generador mediante un sensor mecánico, se puede estimar de manera efectiva la potencia demandada.

3.1.4.1 Máquina de estados de forma analítica

En esta sección se describe una máquina de estados cuyo funcionamiento se organiza en dos estados principales, como se ilustra en la Figura 3.12. En el Estado Cero, la turbina se mantiene en reposo, sin generar energía, y la corriente de referencia calculada se fija en cero. Esta condición cambia cuando se detecta que las revoluciones por minuto (RPM) superan el umbral de arranque, lo que provoca que el sistema transite al Estado Uno. En este segundo estado, la máquina de estados opera en el Punto de Máxima Potencia (MPP), y la corriente de referencia se calcula como el producto de la constante de ganancia K_5 y el cuadrado de las revoluciones. Si, por el contrario, las RPM caen por debajo del valor mínimo establecido, la máquina de estados retorna al Estado Cero, indicando que la turbina ha vuelto a su condición de reposo.

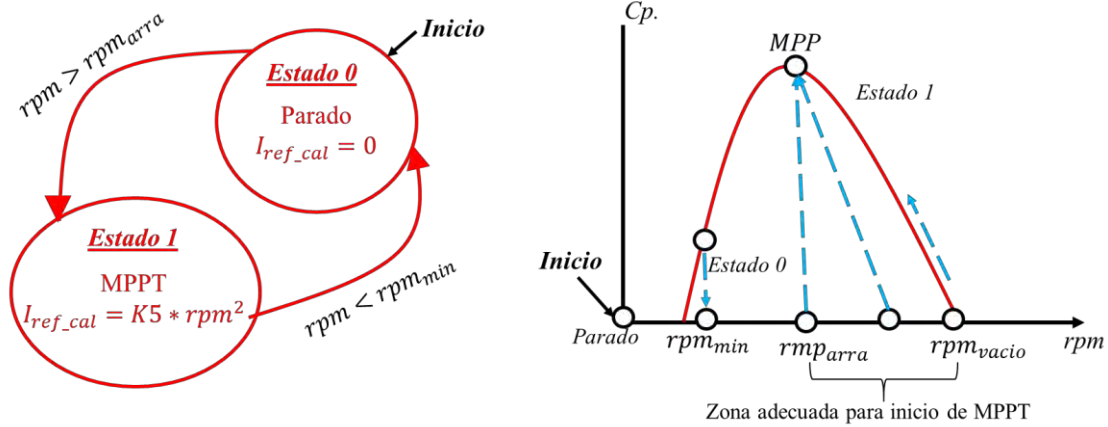


Figura 3.12: Máquina de estados de forma analítica para rpm.

3.1.4.1 Ecuaciones para la técnica cuasi MPPT midiendo rpm

En este tipo de técnicas cuasi MPPT, es fundamental disponer de las ecuaciones necesarias para su correcta implementación. Partiendo del conjunto de ecuaciones ya expuestas en la técnica anterior, se puede establecer que, en el Punto de Máxima Potencia (MPP), existe una relación conocida entre las revoluciones por minuto (RPM) y la velocidad del fluido, como se muestra a continuación. Cabe destacar que los conceptos subyacentes en las expresiones matemáticas que se presentan son coherentes con los que se han estado utilizando en las secciones previas.

$$v_f = \frac{rpm \cdot \pi \cdot R}{30 \cdot TSR_{opt}} \quad (20);$$

Entonces para saber la Potencia extraíble en función de las revoluciones, en ese punto, podemos definir la siguiente ecuación

$$P_{f_max} = \frac{1}{2} \cdot C_{p_{opt}} \cdot \rho \cdot A_{tur} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{30 \cdot TSR_{opt}} \right)^3 \cdot rpm^3$$

Realizamos cambio de variables y obtenemos con:

$$P_{f_max} = \alpha 1 \cdot rpm^3 \quad (21);$$

De igual forma podemos hacer con la tensión de salida del rectificador, entonces para estimar la tensión con en rpm que contamos con lo siguiente:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{rpm \cdot KV}{1000} \rightarrow V_{dc} = \alpha 2 \cdot rpm \quad (22);$$

Realizando ajustes en la ecuación (19) que anteriormente estaba en función de la velocidad del fluido, podemos obtener la siguiente expresión matemática para determinar la corriente equivalente de referencia.

$$I_{eqv_ref} = \frac{P_{f_max}}{V_{dc}} (19) \rightarrow I_{eqv_ref} = \frac{\alpha 1}{\alpha 2} \cdot rpm^2 \rightarrow I_{eqv_ref} = K5 \cdot rpm^2 \quad (23);$$

Podemos determinar K5 con la siguiente expresión.

$$K5 = \frac{\alpha 1}{\alpha 2} \quad (24);$$

Dado que esta técnica emplea únicamente un sensor, es fundamental calcular las revoluciones mínimas y las revoluciones de arranque para determinar si la turbina ha comenzado a girar o en qué estado se encuentra. Este cálculo se basa en el flujo mínimo necesario para que la turbina entre en operación, conocido como valor de corte (Cut-in). Este enfoque permite evaluar si las condiciones son adecuadas para que la turbina inicie su movimiento y funcione correctamente.

$$rpm_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R} \quad (25);$$

$$rpm_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R} \quad (26);$$

Los valores que requiere la ecuación (24) para encontrar la corriente de referencia del MPPT, son las siguientes.

$$\alpha 1 = \frac{1}{2} \cdot C_{p_{opt}} \cdot \rho \cdot A_{tur} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{30 \cdot TSR_{opt}} \right)^3 \quad (27);$$

$$\alpha_2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000} \quad (28);$$

3.1.4.2 Implementación en LTSpice del control cuasi-MPPT con rpm

Como parte de la implementación en el software, se presenta el bloque correspondiente a la técnica, junto con las ecuaciones aplicadas al modelo. Este bloque incluye la máquina de estados, destacada en el recuadro rojo, como se ilustra en la Figura 3.13.

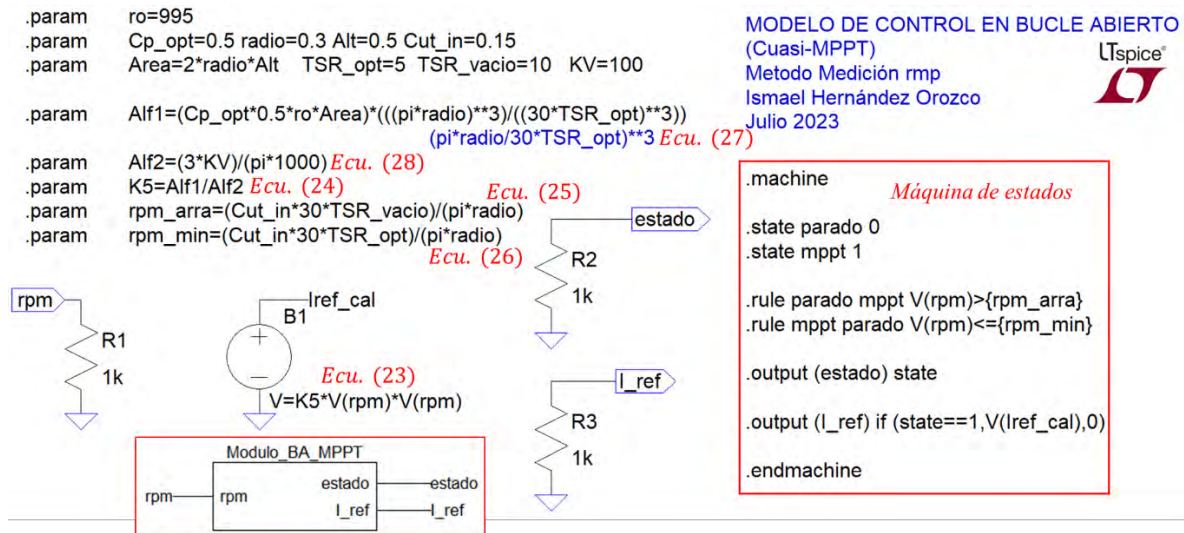


Figura 3.13: Bloque de cuasi-MPPT para medir los rpm.

3.1.5 Técnica MPPT midiendo la frecuencia.

Observar la frecuencia eléctrica a la salida del generador también permite estimar la potencia demandada, lo que ofrece una implementación práctica sin la necesidad de sensores mecánicos. En esta sección, se presenta una máquina de estados, como se muestra en la Figura 3.14, cuyo funcionamiento se basa en dos estados claramente definidos. En el Estado Cero, la turbina se encuentra en reposo, sin generación de energía, y la corriente de referencia calculada se fija en cero. Esta condición cambia cuando se detecta que la frecuencia eléctrica supera el umbral de arranque, momento en el cual el sistema transita al Estado Uno.

En este estado, la máquina de estados se ajusta al Punto de Máxima Potencia (MPP), estableciendo la corriente de referencia calculada como el producto de la ganancia K5 y la frecuencia eléctrica al cuadrado. Si la frecuencia eléctrica desciende por debajo del valor mínimo establecido, la máquina de estados retorna al Estado Cero, reflejando que la turbina ha vuelto a su condición de reposo.

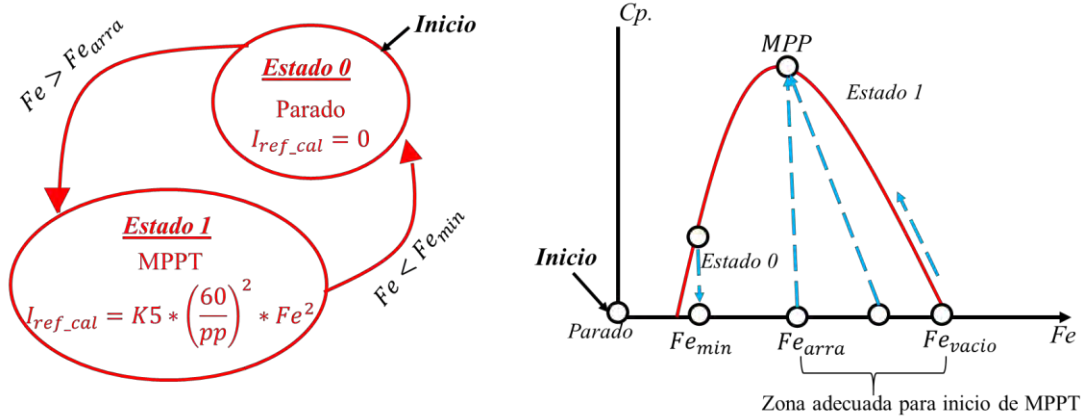


Figura 3.14 Máquina de estados de forma analítica para rpm.

3.1.5.1 Ecuaciones para la técnica cuasi MPPT midiendo frecuencia

Existe una relación directa entre las revoluciones mecánicas (RPM) y la frecuencia eléctrica (Fe) generada a la salida del generador síncrono de imanes permanentes (PMG). Esta relación puede establecerse conociendo el número de pares de polos (pp) del PMG. A partir de esta relación, es posible derivar una expresión matemática que permita calcular la máxima potencia extraíble del sistema. La fórmula básica para obtener la frecuencia eléctrica en función de las revoluciones mecánicas es:

$$Fe = \frac{rpm \cdot pp}{60} \quad (29);$$

Por lo tanto:

$$P_{f_max} = \alpha_1 \cdot rpm^3 \rightarrow P_{f_max} = \alpha_1 \cdot \left(\frac{60}{pp}\right)^3 \cdot Fe^3 \quad (30);$$

Considerando las técnicas previamente discutidas y la naturaleza específica de este tipo de sistemas, es fundamental estimar la tensión de salida debido al rizado producido por el PMG. Esta estimación puede realizarse utilizando las expresiones matemáticas que se presentan a continuación.

$$V_{dc} = \alpha 2 \cdot rpm \rightarrow V_{dc} = \alpha 2 \cdot \frac{60}{pp} \cdot Fe \quad (31);$$

Los valores de $\alpha 1$ y $\alpha 2$ corresponden a las ecuaciones 27 y 28 previamente analizadas en la técnica anterior. Por lo tanto, resulta imprescindible definir tanto la frecuencia de arranque como la frecuencia mínima. Estas frecuencias son fundamentales para que la máquina de estados pueda determinar correctamente el estado operativo de la turbina.

$$Fe_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R \cdot 60} \quad (32);$$

$$Fe_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R \cdot 60} \quad (33);$$

3.1.5.2 Bloque de cuasi-MPPT para medir la frecuencia eléctrica.

Como parte de la implementación en este software para la realización de pruebas, se presenta el bloque de la técnica junto con las ecuaciones correspondientes aplicadas al modelo de dicha técnica. Este bloque está acompañado de la máquina de estados, que se destaca en el recuadro rojo, como se observa en la figura 3.15.

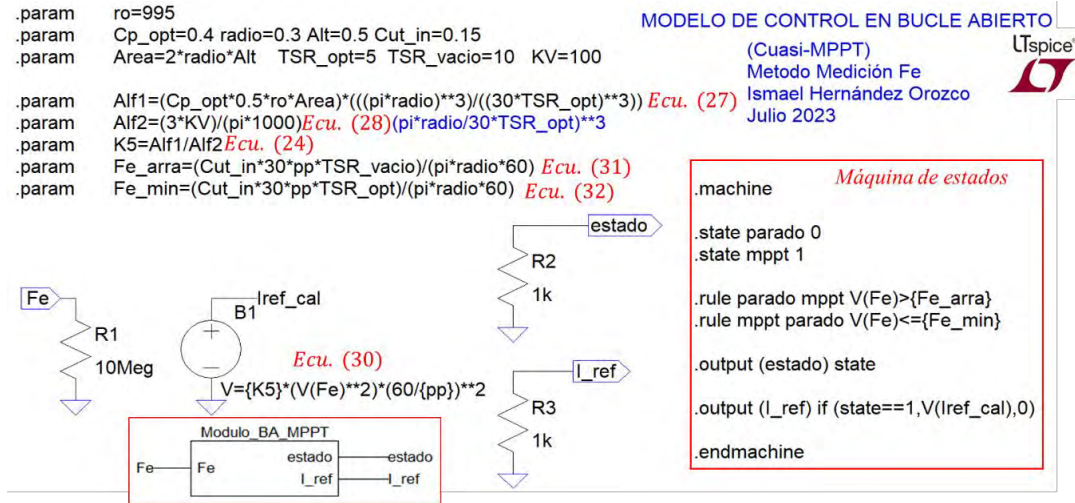


Figura 3.15: Bloque de cuasi-MPPT para medir la frecuencia eléctrica.

3.1.6 Cuadro resumen de técnicas cuasi-MPPT

Se muestra un cuadro resumen de las tres técnicas comparadas, donde se puede apreciar una gran similitud en aplicación, diferenciado los sensores para medir la potencia eléctrica en cada una de las formas de aplicación.

VELOCIDAD FLUIDO	VELOCIDAD ROTACIÓN EJE	FRECUENCIA ELÉCTRICA
$I_{eqv_cal} = K4 \cdot v_f^2$ 2 sensores	$I_{eqv_ref} = K5 \cdot rpm^2$ 1 sensor	$I_{eqv_ref} = K5 \cdot \left(\frac{60}{pp}\right)^2 \cdot Fe^2$ 1 sensor
$K4 = \frac{\pi^2 \cdot 1000 \cdot R \cdot C_{p_opt} \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot 3 \cdot 30 \cdot KV \cdot TSR_{opt}}$ $TSR_{arra} = \text{entre } TSR_{opt} \text{ y } TSR_{vacio}$ $TSR_{min} < TSR_{opt}$ $V_{dc} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{rpm \cdot KV}{1000}$	$\alpha1 = C_{p_opt} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{30 \cdot TSR_{opt}}\right)^3$ $\alpha2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000} \quad K5 = \frac{\alpha1}{\alpha2}$ $rpm_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R}$ $rpm_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R}$ $V_{dc} = \alpha2 \cdot rpm$	$Fe_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R \cdot 60}$ $Fe_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R \cdot 60}$ $V_{dc} = \alpha2 \cdot \frac{60}{pp} \cdot Fe$

Tabla 3.2: Resumen de técnicas cuasi-MPPT o Feedforward.

3.1.7 Algoritmos MPPT Tradicionales

Entre las estrategias tradicionales para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPP), que no requieren un conocimiento profundo de la planta, destacan dos algoritmos ampliamente utilizados: el de Perturbar y Observar (P&O) y el de Conductancia Incremental. Estos métodos se basan en la modificación de un parámetro (como la tensión, revoluciones mecánicas, frecuencia eléctrica, o velocidad del fluido). La interacción entre estos parámetros permite la búsqueda activa y eficiente del MPP en sistemas de generación de energía.

3.1.7.1 Perturbar & observar

Observar la potencia demandada por el convertidor, para después realizar una perturbación y volver a observar, a este enfoque es uno de los más populares y se conoce comúnmente como "algoritmo Perturbar y Observar", aunque sería más preciso llamarlo "Perturbar, esperar y Observar", por la naturaleza del sistema hidráulico.

En la Figura 3.16 y 3.17 se presenta un diagrama de flujo y el comportamiento del algoritmo en la curva de potencia de la turbina, donde detalla el funcionamiento del algoritmo Perturbar y Observar (P&O), destacando seis estados. El proceso inicia en el estado cero cuando la frecuencia es inferior a la frecuencia mínima, y transita al estado uno cuando es igual o superior a la frecuencia de arranque (una faceta de la técnica MPPT que mide frecuencia). Desde el estado uno, el sistema inicia con una corriente inicial, dando lugar a la generación de potencia de salida y la entrada a estados sucesivos.

El ciclo se repite al incrementar la corriente equivalente en un intervalo de tiempo definido. Si se cumple la condición de que la potencia actual es mayor a la potencia anterior, el sistema transita al estado dos; de lo contrario, entra al estado cuatro para hacer un decremento de la corriente equivalente. Tanto el estado dos como el estado tres implican una espera antes de retornar al estado cuatro para repetir el proceso de decremento.

Tras una espera, si la potencia actual es menor que la anterior, se ingresa al Estado dos, completando así el ciclo de funcionamiento de este algoritmo de Perturbar y Observar. Este enfoque cíclico y reiterativo permite la adaptación continua del sistema para optimizar la generación de energía al buscar eficientemente el punto de máxima potencia.

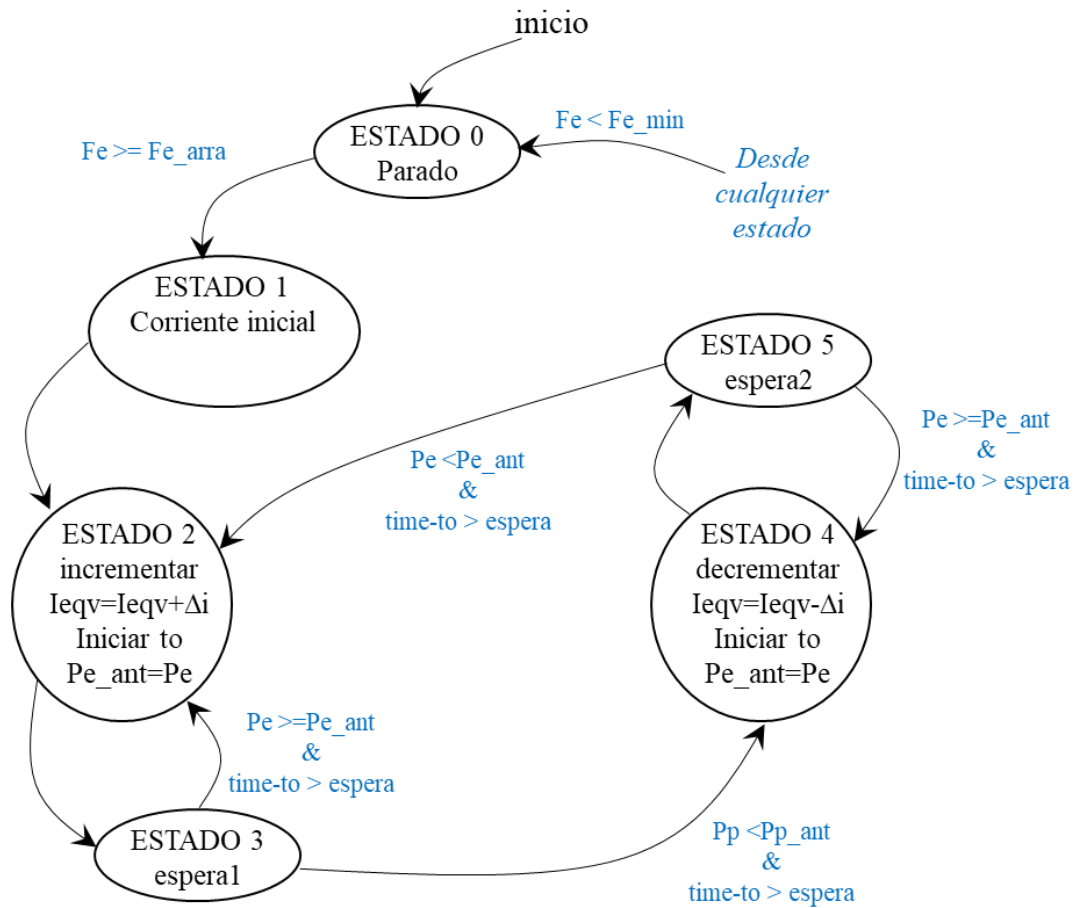


Figura 3.16: Diagrama de la máquina de estados del P&O.

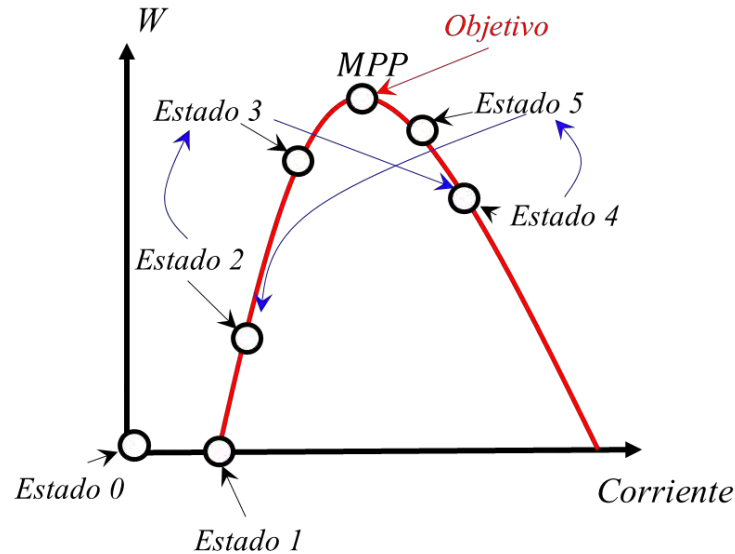


Figura 3.17: Curva de potencia de la turbina con P&O.

En la Figura 3.18 se presenta la implementación de la máquina de estados del algoritmo Perturbar y Observar en el software LTSpice. Se evidencia una entrada que corresponde a la frecuencia eléctrica, utilizada para determinar el estado actual de la potencia extraíble del sistema. Las dos salidas destacadas muestran la corriente equivalente de referencia y el estado actual de la máquina de estados.

Es crucial destacar que el tiempo de espera y la magnitud de Delta (Se estableció en 200 mA) representan valores constantes para la máquina de estados. Esto significa que, si se reduce el tiempo de espera y se disminuye el valor de Delta, el algoritmo exhibirá menor fluctuación, aunque requerirá más tiempo para alcanzar el punto de máxima potencia. Este ajuste de parámetros es esencial para equilibrar la velocidad de convergencia y la estabilidad del algoritmo en la búsqueda eficiente del punto óptimo de potencia.

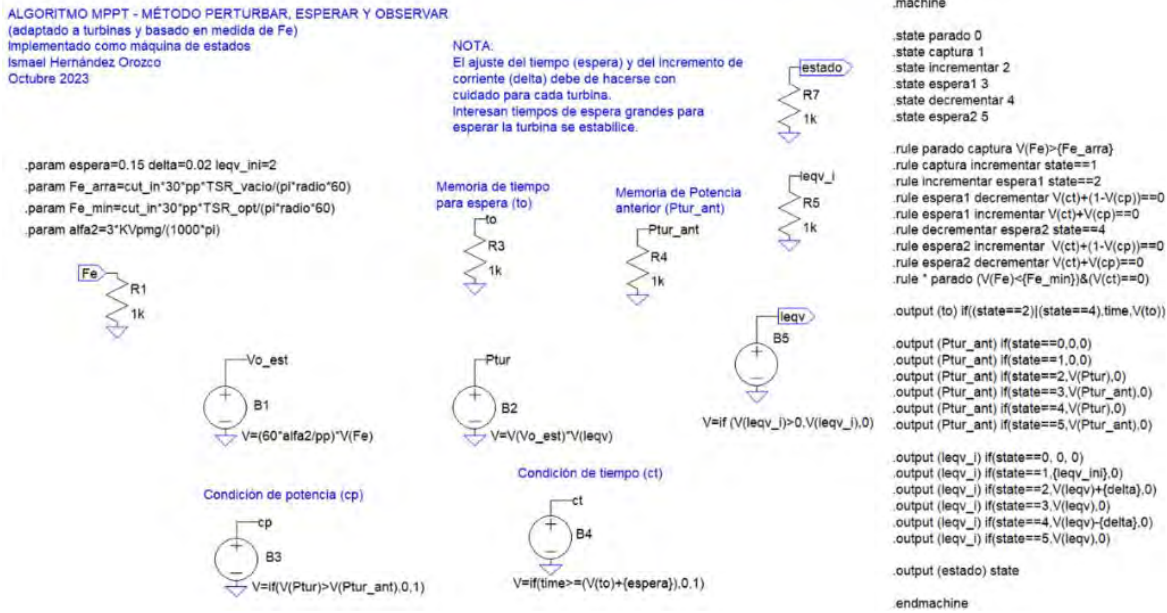


Figura 3.18: Bloque de máquina de estados del P&O en LTSpice.

3.1.8 Cuadro resumen del algoritmo P&O

En esta sección se presenta un cuadro resumen que compara las tres técnicas analizadas, destacando sus similitudes en cuanto a la aplicación. Las diferencias se encuentran en los tipos de sensores empleados para medir la potencia eléctrica, lo que conlleva a distintas formas de implementación. Asimismo, se incluye la definición de las condiciones de arranque correspondientes a cada sensor utilizado.

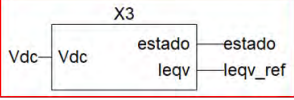
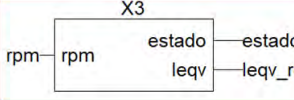
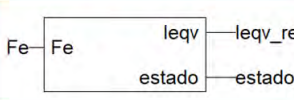
MIDIENDO TENSIÓN	VELOCIDAD ROTACIÓN EJE (RPM)	FRECUENCIA ELÉCTRICA
1 sensor	1 sensor	1 sensor
		
$V_{dc} < V_{dc_{min}}$ $V_{dc} > V_{dc_{arra}}$	$\alpha_2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000}$ $rpm_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R}$ $rpm_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R}$	$\alpha_2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000}$ $Fe_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R \cdot 60}$ $Fe_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R \cdot 60}$
	$V_{dc} = \alpha_2 \cdot rpm$	$V_{dc} = \alpha_2 \cdot \frac{60}{pp} \cdot Fe$

Tabla 3.3: Resumen del algoritmo Perturbar & Observar.

3.1.8.1 Conductancia Incremental

Observar la derivada de la potencia demandada permite implementar otro algoritmo conocido como "Conductancia Incremental (INC)". En la Figura 3.19, se presenta una sección de la máquina de estados correspondiente a este algoritmo, la cual ha sido desarrollada a partir de la estructura del algoritmo Perturbar y Observar (P&O). La metodología utilizada se basa en la variación de la potencia (Delta de potencia) para determinar si el incremento o decremento en la potencia es positivo o negativo, guiando así la búsqueda del punto de máxima potencia (MPP).

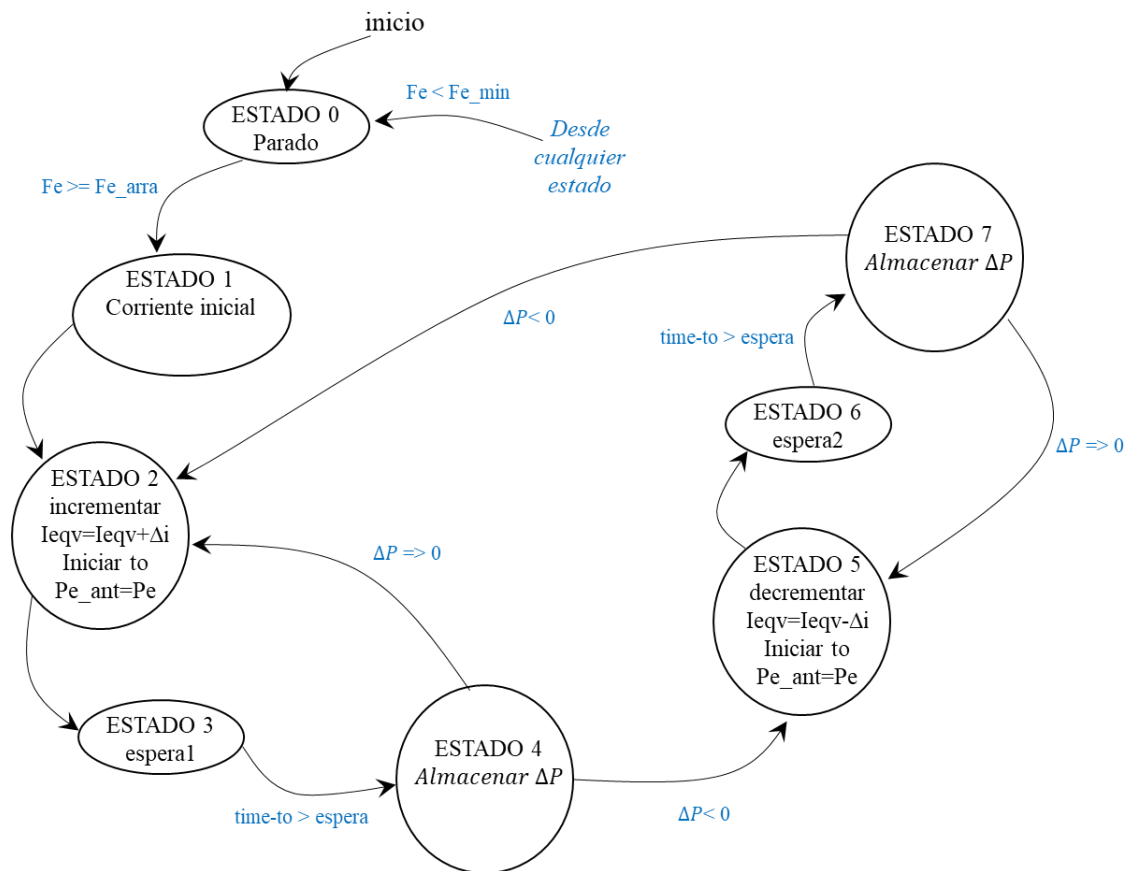


Figura 3.19: Diagrama de la máquina de estados del INC.

En este enfoque, la derivada de potencia se utiliza para evaluar la distancia relativa al MPP, permitiendo una búsqueda más eficiente. Esta evaluación se realiza calculando la derivada de la potencia respecto a la corriente. La derivada de la curva de potencia de una turbina puede ser negativa en el lado derecho y positiva en el lado izquierdo.

Con esta premisa, se emplea una Delta de corriente máxima que reflejaría la distancia respecto al MPP. En este contexto, el valor máximo de Delta sería considerablemente alto, similar al utilizado en el algoritmo P&O, indicando una gran separación del punto MPP. Por otro lado, si la Delta de corriente es mínima, ello implica proximidad al MPP. En este caso, el valor mínimo de Delta sería más reducido, diseñado para evitar fluctuaciones innecesarias al acercarse al MPP tal como se muestra en la figura 3.20. Este enfoque permite una adaptabilidad dinámica en la búsqueda del punto de máxima potencia, ajustando la estrategia según las condiciones específicas del sistema.

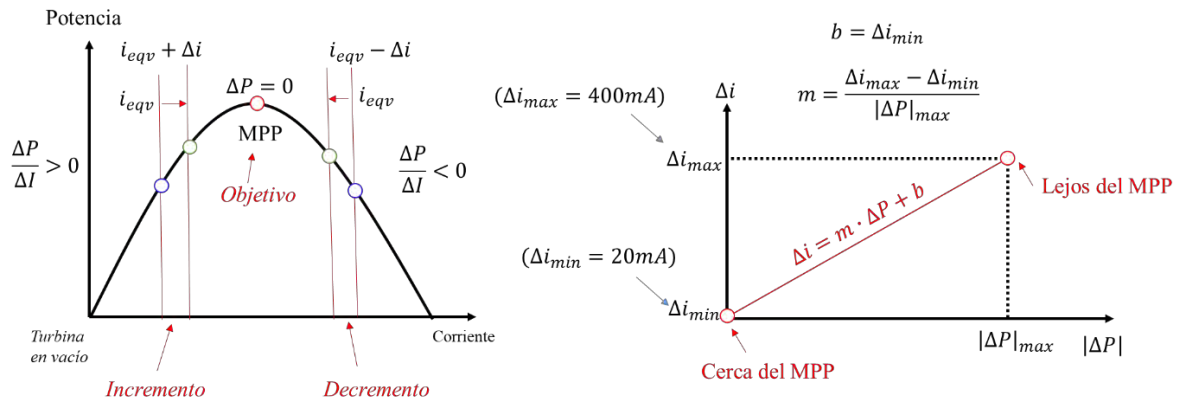


Figura 3.20: Funcionamiento del algoritmo INC en la curva de potencia.

3.1.9 Cuadro resumen del algoritmo INC

En esta sección, se presenta un cuadro resumen de las tres técnicas comparadas, donde se destaca la similitud en su aplicación, diferenciándose principalmente en los sensores utilizados para medir la potencia eléctrica.

MIDIENDO TENSIÓN 1 sensor	VELOCIDAD ROTACIÓN EJE (RPM) 1 sensor	FRECUENCIA ELÉCTRICA 1 sensor
$V_{dc} < V_{dc_{min}}$ $V_{dc} > V_{dc_{arra}}$	$\alpha 2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000}$ $rpm_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R}$ $rpm_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R}$	$\alpha 2 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{KV}{1000}$ $Fe_{arra} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{vacio}}{\pi \cdot R \cdot 60}$ $Fe_{min} = \frac{cut_{in} \cdot 30 \cdot pp \cdot TSR_{opt}}{\pi \cdot R \cdot 60}$
	$V_{dc} = \alpha 2 \cdot rpm$	$V_{dc} = \alpha 2 \cdot \frac{60}{pp} \cdot Fe$

Tabla 3.4: Resumen del algoritmo Conductancia Incremental.

Nota: Se incorpora el delta de potencia en las salidas del bloque del algoritmo Conductancia Incremental. También como en el método de P&O es necesario colocar las condiciones de arranque de cada sensor.

3.2 Resultados de investigación

Con el propósito de realizar las simulaciones correspondientes a cada método de MPPT propuesto como candidato para comparación en este estudio, se procederá a la etapa de presentación de resultados. En esta, se mostrará el comportamiento de las simulaciones realizadas en el software LTspice.

El orden de las simulaciones comenzará con las técnicas cuasi-MPPT, empleando diferentes tipos de sensores. A continuación, se evaluarán los algoritmos Perturbar y Observar (P&O) en sus distintas variantes. Finalmente, se analizará el método de Conductancia Incremental (INC).

Estas simulaciones permitirán evaluar el desempeño de las técnicas en un caso de estudio propuesto, con el fin de identificar la mejor o las mejores alternativas de MPPT en sistemas de generación de energía mediante microturbinas hidrocineéticas.

3.2.1 Resultados de simulación de las técnicas cuasi-MPPT o Feedforward

3.2.1.1 Simulaciones midiendo la velocidad del fluido

Para comprender el método empleado, es fundamental analizar la Figura 3.21, la cual presenta los resultados de la simulación con medición de la velocidad del fluido, evidenciados a través de tres gráficas distintas. Al examinar estas gráficas de la parte superior a la inferior, se puede definir lo siguiente:

En el primer par de gráficas (en color azul y rojo), se muestra la potencia teórica extraíble calculada a partir del modelo de la turbina. Simultáneamente, se presenta la potencia extraída, obtenida mediante el producto entre la corriente de referencia (derivada de la técnica MPPT) y la tensión estimada. La comparación entre ambas potencias permite evaluar la eficacia del método de búsqueda de máxima potencia. Al observar estas gráficas, se puede confirmar que el método utilizado efectivamente está extrayendo la máxima potencia posible, incluso frente a variaciones en la velocidad del fluido.

La segunda gráfica (en color verde) detalla el Tip Speed Ratio (TSR). En esta gráfica, se destaca que cuando el TSR supera el umbral de arranque, se cumple la condición necesaria para que la máquina de estados permita que la turbina inicie la generación de potencia. Además, se observa que el TSR alcanza su valor óptimo cuando la turbina opera en su punto máximo de extracción de potencia.

Finalmente, la tercera gráfica (en color azul) ilustra los estados operativos del sistema MPPT, los cuales se dividen en dos: el estado cero y el estado uno. Cada estado responde a condiciones específicas relacionadas con las variaciones en la velocidad del fluido, tal como se describió en las figuras 3.10 y 3.11. Estas representaciones visuales ofrecen una evaluación detallada de los resultados de la simulación, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de velocidad del fluido y demostrando claramente la efectividad de la técnica para la extracción de máxima potencia.

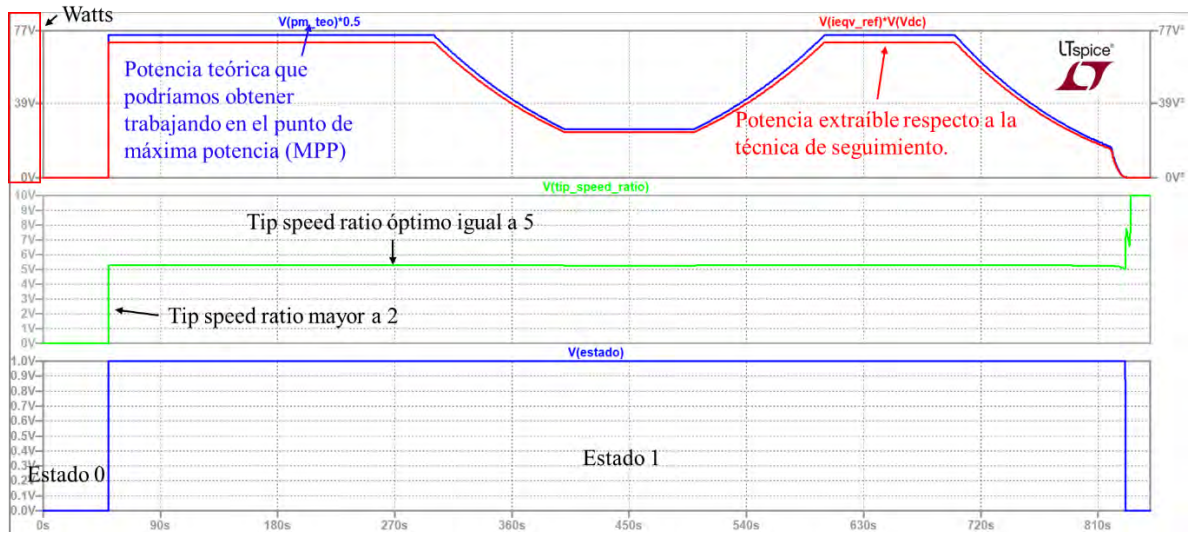


Figura 3.21: Resultados de simulación midiendo la velocidad del fluido.

3.2.1.2 Simulaciones midiendo las revoluciones (rpm)

Los resultados de la simulación enfocada en la medición de las revoluciones por minuto se presentan en la Figura 3.22, distribuidos en tres gráficas.

En la primera gráfica, se muestra la potencia teórica extraíble, destacando que el sistema opera en el punto de máxima potencia (MPP). De manera simultánea, se visualiza la potencia eléctrica generada como resultado de la aplicación de la técnica MPPT.

La segunda gráfica ilustra las revoluciones por minuto (RPM), donde se evidencia que la turbina inicia la generación de potencia cuando las revoluciones superan el umbral de arranque. En este punto, la máquina de estados (representada en la gráfica inferior de color azul) transita al estado uno. En contraste, cuando las revoluciones caen por debajo de las revoluciones mínimas, el sistema retorna al estado cero, indicando que la turbina no está generando potencia.

Estos resultados destacan la eficacia de la técnica basada en la medición de las revoluciones por minuto para alcanzar el MPP. Además, se observa que este enfoque es consistente y comparable con la técnica previamente descrita, confirmando su viabilidad en la optimización de la generación de energía.

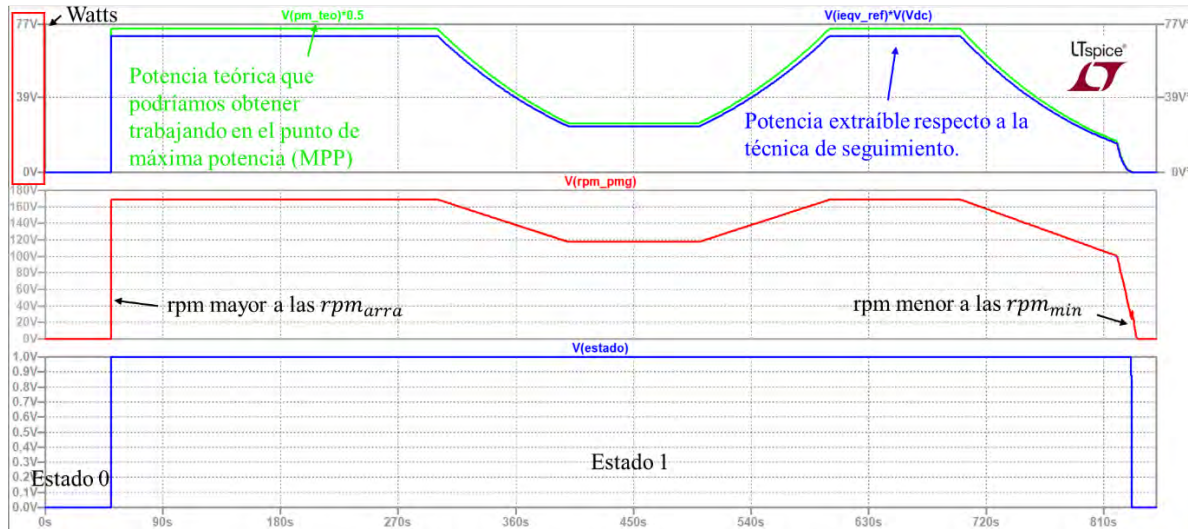


Figura 3.22: Resultados de simulación midiendo las revoluciones.

3.2.1.3 Simulaciones midiendo la frecuencia eléctrica (Fe)

Uno de los métodos con mayor potencial de aplicación es el que se basa en la medición de la frecuencia eléctrica del generador síncrono permanente (PMG), debido a su menor complejidad en la implementación de sensores. Este enfoque es considerado por algunos autores como "libre de sensores", ya que la medición de la frecuencia eléctrica puede integrarse dentro del propio generador, evitando la exposición a las condiciones ambientales, en contraste con los sensores utilizados en otras técnicas.

En la Figura 3.23 se presentan los resultados de la simulación centrada en la medición de la frecuencia eléctrica, los cuales se muestran en tres gráficas. La primera gráfica ilustra la potencia teórica extraíble, destacando que la operación se mantiene en el punto de máxima potencia (MPP). Paralelamente, se muestra la potencia eléctrica generada como resultado de la aplicación de la técnica MPPT.

En la segunda gráfica, que representa la frecuencia eléctrica, se observa que la turbina inicia la generación de potencia cuando la frecuencia medida supera el umbral de arranque. En este punto, la máquina de estados (representada en la gráfica inferior de color azul) transita

al estado uno. En contraste, si la frecuencia es inferior al valor mínimo establecido, la máquina de estados retorna al estado cero, indicando que la turbina no está generando potencia.

Este enfoque evidencia su simplicidad y eficacia, al evitar la necesidad de sensores externos y ofrecer un rendimiento comparable a las técnicas previamente analizadas, alineándose de manera efectiva con la obtención del MPP.

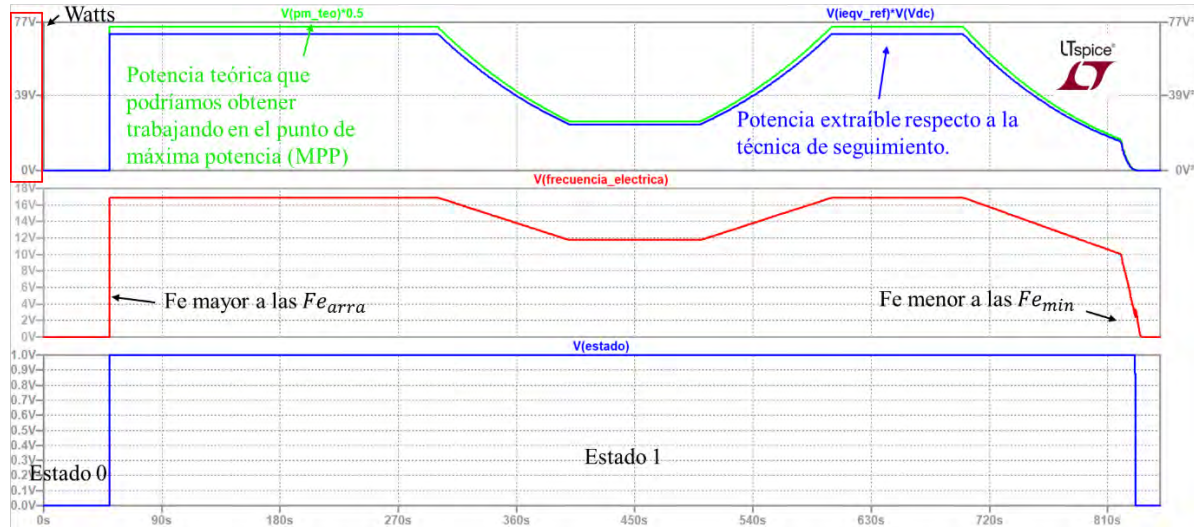


Figura 3.23: Resultados de simulación midiendo la frecuencia eléctrica.

3.2.1.4 Resultados de simulación del algoritmo Perturbar & Observar

Recordando lo expuesto en la sección de la metodología, donde se destacó el uso de algoritmos tradicionales como el de Perturbar y Observar (P&O), se enfatiza que estos métodos no requieren un conocimiento profundo de la planta (Turbina-PMG) para su implementación. Este tipo de algoritmos son ampliamente utilizados en técnicas de MPPT debido a su simplicidad y eficiencia, y su funcionamiento se basa en la observación y perturbación de las variables de operación del sistema para alcanzar el punto de máxima potencia (MPP).

Una vez explicado el funcionamiento general de los algoritmos MPPT, es necesario abordar las simulaciones que involucran el uso de diferentes sensores, como el voltímetro, el

tacómetro y el frecuencímetro. Estos sensores permiten la medición de variables clave, tales como la tensión, las revoluciones por minuto (RPM) y la frecuencia eléctrica, respectivamente, contribuyendo de manera significativa a la implementación práctica de algoritmos de seguimiento del MPP en sistemas de generación de energía hidrocinética.

3.2.1.5 Simulaciones de P&O midiendo la tensión de salida

En la Figura 3.24 se presentan los resultados de simulación del P&O, estructurados de manera similar a las visualizaciones previamente expuestas. En este formato, se destacan tres gráficas esenciales: una representa las potencias, con una curva para la potencia teórica extraíble, otra para la potencia extraíble según el algoritmo P&O, y una tercera en color negro que refleja el comportamiento de la máquina de estados.

En la gráfica correspondiente a la máquina de estados (color negro), se observa que, cuando la turbina genera potencia, la máquina de estados se sitúa en los estados 2 y 3, incrementando y esperando para evaluar la dirección óptima hacia el punto de máxima potencia. Una vez alcanzado este punto, la máquina de estados transita entre los estados 4 y 5, vigilando la señal de prueba para detectar cualquier disminución en la velocidad del fluido.

Adicionalmente, en la misma gráfica de la máquina de estados con un incremento constante de corriente de 200 mA, la cual nos ayuda a encontrar el punto de máxima potencia de una manera constante, esto quiere decir que, si su delta de corriente es grande, tardar menos en encontrar el MPP, pero su fluctuación será mucho más grande al encontrar dicho punto, ya que de manera activa seguirá buscando. Por lo contrario, si su delta de corriente es mínima, este algoritmo tardara mucho más en encontrar el MPP, sin embargo, fluctuara menos al encontrarlo.

En el escenario de cambio de la velocidad del fluido de 1 m/s a 0.8 m/s, la máquina de estados ajusta su operación de estado 3 a estado 0, identificando la falta de generación suficiente de tensión mínima debido a la disminución en la velocidad. Posteriormente, con

un cambio de velocidad de 0.8 m/s a 1 m/s, la máquina de estados reanuda la búsqueda del punto de máxima potencia.

Estos resultados ilustran la adaptabilidad y eficacia del algoritmo P&O frente a variaciones en la velocidad del fluido, evidenciando su capacidad para ajustar dinámicamente la operación y buscar eficientemente el punto óptimo de potencia.

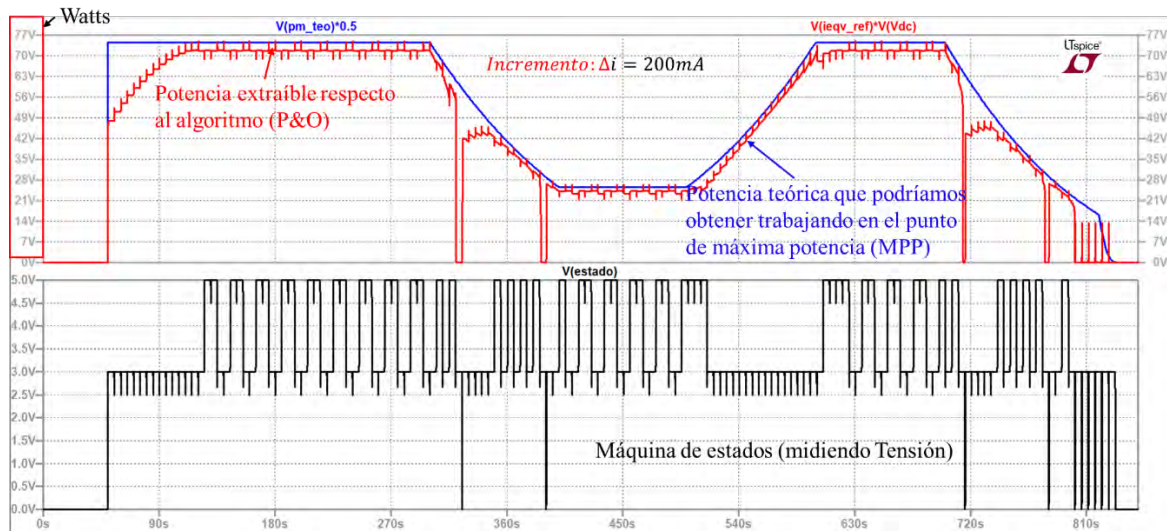


Figura 3.24: Resultados de simulación P&O a partir de la tensión de salida.

A continuación, se presentan las simulaciones de los resultados de la simulación (figura 3.25 y 3.26) del algoritmo "perturbar y observar" por un lado basados en la medición de las revoluciones por minuto y por otro caso midiendo la frecuencia eléctrica. Este par de simulaciones que continuación se muestran guardan una notable similitud con el método anterior, representada en la figura 3.24, donde se exhibe la potencia teórica extraíble, identificada en color azul, junto con una gráfica en color rojo que ilustra la búsqueda activa del Punto de Máxima Potencia (MPPT).

En la siguiente figura 3.25 y 3.26 podemos observar las dos formas de aplicación y también la enorme similitud entre el método anterior y el que se presenta a continuación. Sin embargo, es necesario dar un punto de relevancia, que cada técnica se puede comportar de

manera diferente a la otra dependiendo el diseño que se utilice. De manera clara en el modelo real debemos considerar la forma de aplicación (Selección del tipo de sensor), entre diferentes características que cuente el sitio donde se puede utilizar este tipo de sistema de cosecha de energía.

En este caso queda poco por decir respecto al funcionamiento de este par de simulaciones, el comportamiento es el mismo, solo cambiamos el sensor de medición. Básicamente se realizó una forma similar a la técnica Cuasi MPPT con los diferentes sensores. Esto se muestra, con la finalidad de hacer énfasis que este tipo de sistemas se puede aplicar de diferentes maneras y siempre tendrá buena respuesta al encontrar el MPPT.

3.2.1.6 Simulaciones de P&O midiendo RPM

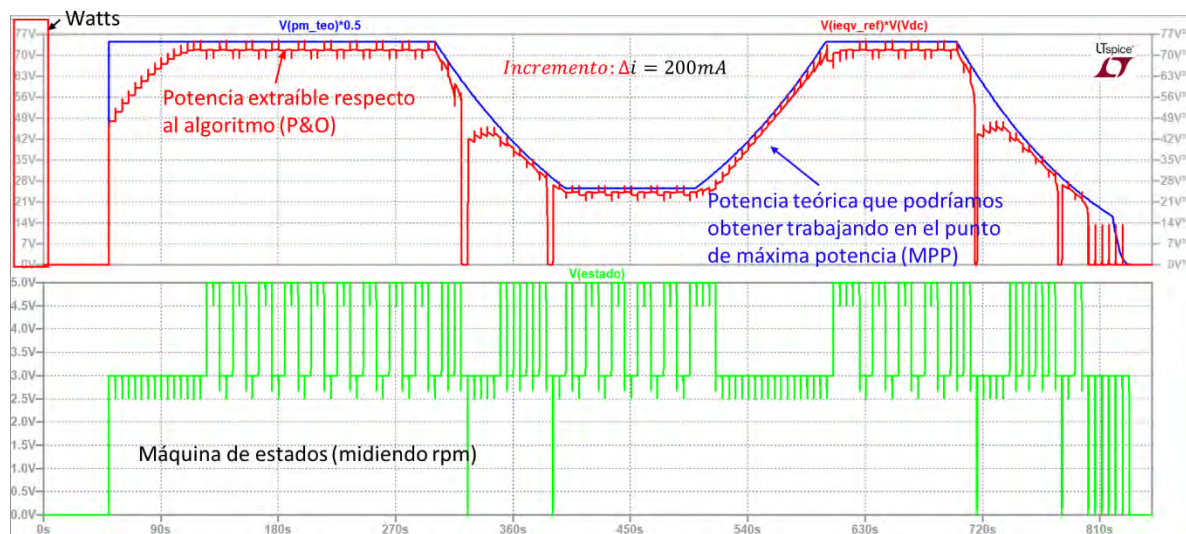


Figura 3.25: Resultados de simulación P&O a partir del rpm.

3.2.1.7 Simulaciones de P&O midiendo Frecuencia Eléctrica

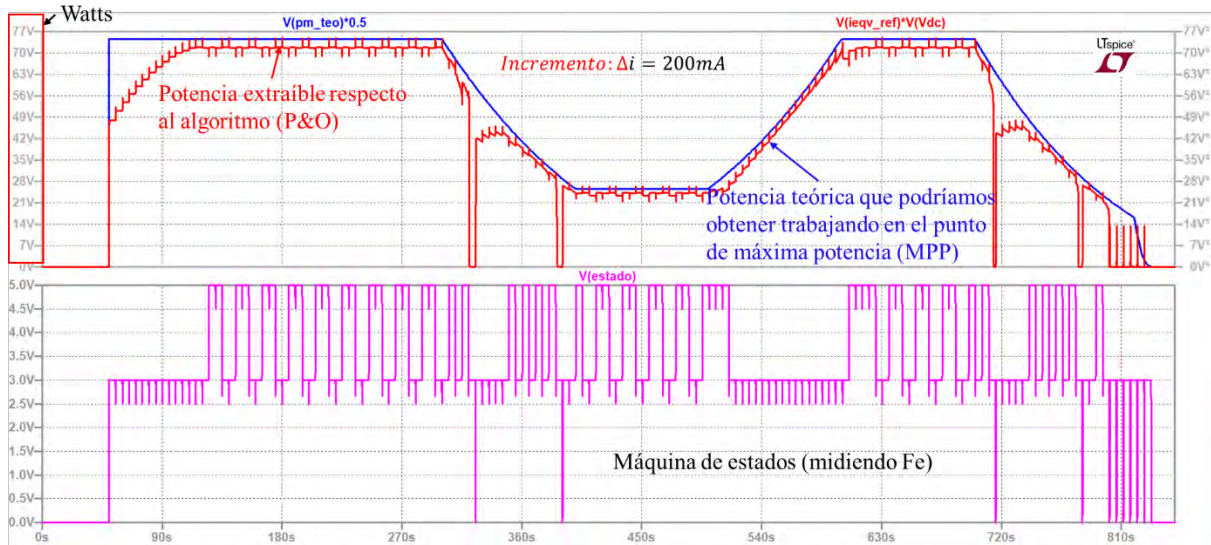


Figura 3.26: Resultados de simulación P&O a partir de la frecuencia eléctrica.

3.2.2 Resultados de simulación de conductancia incremental

En esta sección de resultados, se mostrarán las simulaciones de búsqueda activa denominado como conductancia incremental, con un orden similar a la técnica anterior utilizando diferentes tipos de sensores, esto para saber la potencia extraída y denominar si se encuentra en un punto máximo de potencia.

3.2.2.1 Simulaciones de INC midiendo Frecuencia Eléctrica

En la figura 3.27 se presentan los resultados de la simulación del algoritmo de conductancia incremental, el cual se implementa mediante la medición de la frecuencia para determinar una corriente de referencia equivalente. Esta corriente de referencia nos permite calcular la potencia del sistema utilizando el algoritmo mencionado. En las gráficas mostradas, se distingue una curva en color negro que representa la potencia teórica alcanzable operando en el punto de máxima potencia.

Asimismo, se presenta una curva en color rojo que representa la potencia extraíble, en relación con el algoritmo de conductancia incremental. Además, se incluye una gráfica en

color verde que indica la variación en la potencia (Delta de potencia), la cual indica la proximidad al punto de máxima potencia. Un valor cercano a cero indica que está cerca del punto de máxima potencia, mientras que un valor positivo o negativo indica si nos encontramos a la derecha o a la izquierda de la curva de potencia de la turbina.

Por otro lado, se observa que el algoritmo cuenta con un incremento máximo de 400 mA y un incremento mínimo de 20 mA. Esto significa que cuando la Delta de potencia indica que nos encontramos lejos del punto de máxima potencia, el incremento es máximo, lo que permite encontrar rápidamente el Punto de Máxima Potencia (MPP). Una vez que se encuentra este punto, las fluctuaciones son mínimas debido a que el incremento de corriente cambiará a mínimo.

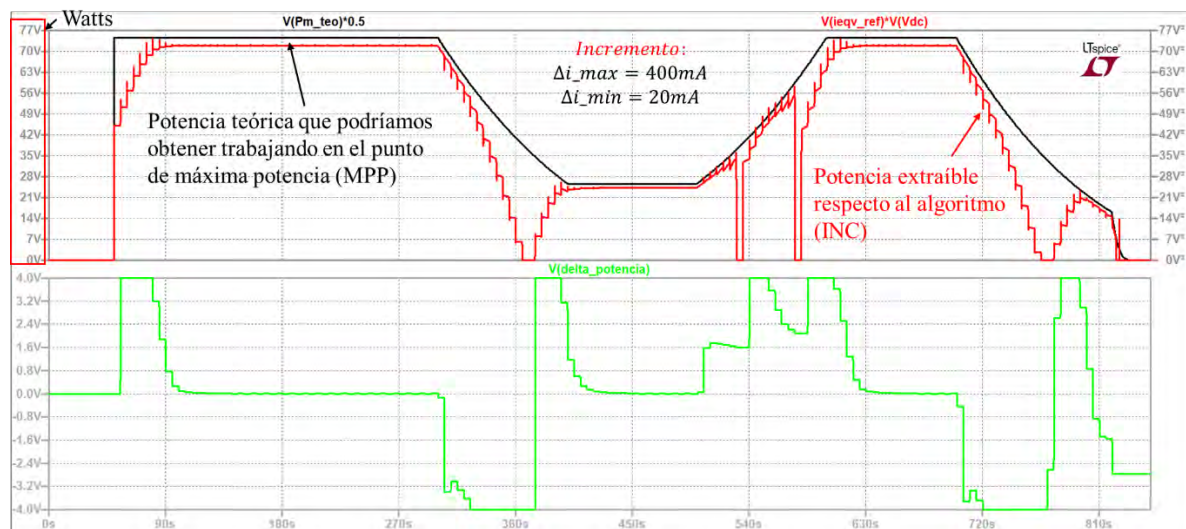


Figura 3.27: Resultados de simulación INC a partir de la tensión de salida.

En las figuras 3.28 y 3.29 se presenta una variante de aplicación del algoritmo de conductancia incremental. Su funcionamiento es idéntico al mostrado en la figura 3.27, con la única diferencia siendo la variante de la medición de entrada. Es decir, este algoritmo puede aplicarse tanto a partir de las revoluciones por minuto como de la tensión de salida, adaptándose así a diferentes configuraciones y necesidades del sistema.

3.2.2.2 Simulaciones de INC midiendo RPM

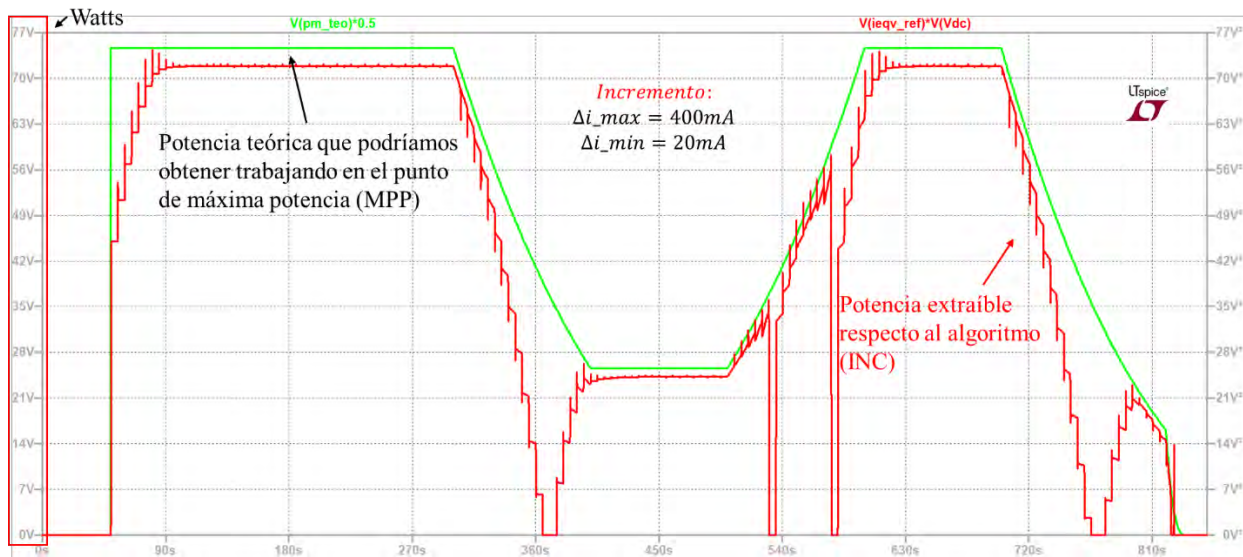


Figura 3.28: Resultados de simulación INC a partir del rpm.

3.2.2.3 Simulaciones de INC midiendo la tensión de salida

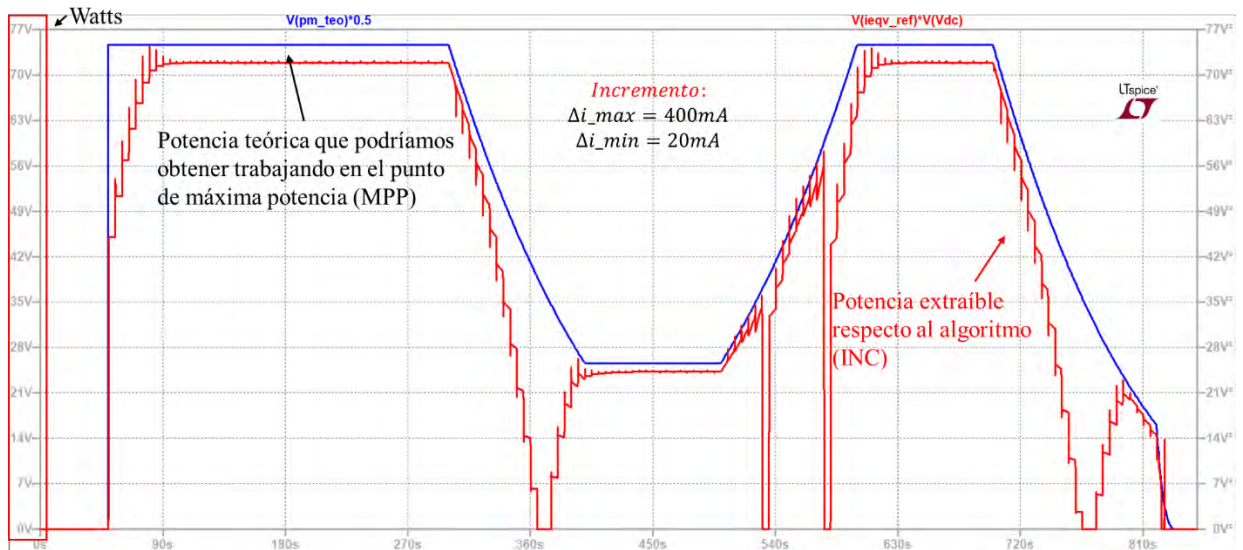


Figura 3.29: Resultados de simulación INC a partir de la tensión de salida.

3.3 Conclusiones de resultados

Para iniciar con los comentarios y conclusiones sobre las técnicas y algoritmos de búsqueda del MPP, es fundamental hacer un breve resumen de las estrategias comparadas en esta sección. Con este propósito, se presenta la Tabla 3.5, en la cual se describen los métodos de implementación de MPPT, sus características principales y el grado de complejidad en relación con su instalación en un sistema aplicado en condiciones reales. Esta tabla permite visualizar de manera clara las diferencias y similitudes entre las técnicas, facilitando así una mejor comprensión de su viabilidad y desempeño en aplicaciones prácticas.

Técnica o algoritmo (Diferentes sensores)	Complejidad	Requerimiento de Hardware	Características
Cuasi MPPT midiendo (V_f)	Medio	2 sensores (Caudalímetro y TSR)	- Calcula el MPP teórico a partir del conocimiento de la planta, pero puede tener imprecisiones en la medida que la planta se deteriora.
Cuasi MPPT midiendo (rpm)	Simple	1 sensor (Tacómetro)	- La opción midiendo (Fe) puede resultar la más atractiva en términos de costo y complejidad.
Cuasi MPPT midiendo (Fe)	Simple	1 sensor (Frecuencímetro)	
P&O a partir de (V_{dc})	Simple	1 sensor (Voltímetro)	- Se posiciona alrededor del MPP y solo requiere conocer algunas variables de la planta (salvo el caso de medición única V_{dc}).
P&O a partir de (rpm)	Medio simple	1 sensor (Tacómetro)	- La fluctuación sobre el MPP y la velocidad para encontrar el mismo, depende de la cantidad del incremento fijo de corriente seleccionado.
P&O a partir de (Fe)	Simple	1 sensor (Frecuencímetro)	
INC a partir de (V_{dc})	Simple	1 sensor (Voltímetro)	- Se posiciona alrededor del MPP y solo requiere conocer algunas variables de la planta (salvo el caso de medición única V_{dc}), obteniendo una mayor precisión gracias a que puede determinar la lejanía con el MPP.
INC a partir de (rpm)	Medio simple	1 sensor (Tacómetro)	- La fluctuación sobre el MPP y la velocidad para encontrar el mismo, puede mejorar con respecto a P&O, si se trabaja con un incremento de corriente dinámico dependiendo de la lejanía del MPP.
INC a partir de (Fe)	Simple	1 sensor (Frecuencímetro)	

Tabla 3.5: Tabla comparativa de estrategias MPPT.

En la Tabla 3.5 se presenta una comparativa parcial de las técnicas cuasi-MPPT y los algoritmos simulados en LTSpice. Durante el análisis de estas simulaciones, se observó que cada técnica presenta características únicas, lo que hace necesario dividir las en dos grupos. El primero incluye las técnicas cuasi-MPPT, donde es esencial conocer a fondo la planta (Turbina-PMG), mientras que el segundo abarca los algoritmos clásicos de búsqueda activa, como Perturbar y Observar (P&O) y la Conductancia Incremental (INC).

En estos dos grupos de métodos para la identificación del Punto de Máxima Potencia (MPP) en turbinas hidrocínéticas, es fundamental realizar comentarios explicativos detallados sobre cada técnica y algoritmo. Esto permitirá llevar a cabo una comparación justa y precisa en función de las particularidades de cada caso, considerando tanto su complejidad como su efectividad en la obtención del MPP en diferentes condiciones de operación.

3.3.1 Comentarios de las técnicas de cuasi-MPPT o Feedforward

La técnica basada en la medición de la velocidad del fluido; requiere la utilización de dos sensores: uno para medir la velocidad del fluido y otro para monitorear el comportamiento de la turbina. Esta técnica se aplica de manera intuitiva para identificar el Punto de Máxima Potencia (MPP). Si bien su implementación en un sistema real puede presentar dificultades prácticas, su inclusión en este estudio permitió realizar una comparativa detallada de su desempeño en simulación. Los resultados mostraron que, a pesar de las limitaciones en su aplicación práctica, la técnica se comportó de manera confiable y efectiva durante las simulaciones, brindando un análisis valioso de su funcionamiento teórico.

La técnica basada en la medición de las revoluciones por minuto (RPM); requiere un sensor colocado en el acoplamiento entre la turbina y el PMG, ofreciendo una clara ventaja en términos de simplicidad, facilidad de implementación y costo, en comparación con la técnica que utiliza la medición de la velocidad del fluido. Sin embargo, al igual que en la técnica anterior, el sensor queda expuesto a las condiciones ambientales, lo que puede conllevar posibles problemas de deterioro o fallas a largo plazo debido a la intemperie. A pesar de estas consideraciones, su simplicidad la convierte en una alternativa viable para ciertos entornos.

La técnica basada en la medición de la frecuencia; solo requiere un sensor ubicado directamente en la salida del PMG, el cual puede ser instalado dentro del generador, evitando así la exposición a la intemperie, como sucede en las técnicas anteriores. Este enfoque ofrece una aplicación más sencilla y confiable, destacándose como una opción más práctica en comparación con los métodos previos. Además, esta técnica puede combinarse eficazmente con algoritmos de búsqueda activa, como el Perturbar y Observar (P&O) o la Conductancia Incremental (INC), lo que refuerza su versatilidad y aplicabilidad en sistemas de generación de energía hidrocinética.

3.3.2 Comentarios de los algoritmos de búsqueda activa (P&O, INC)

La segunda familia, como su título indica, está compuesta por algoritmos tradicionales denominados de "búsqueda activa", los cuales no requieren un conocimiento profundo de la planta para identificar el Punto de Máxima Potencia (MPP). Estos algoritmos permiten realizar una aplicación similar a las técnicas cuasi-MPPT para llevar a cabo una comparativa. Tal como se observa en la Tabla 5.1, se presentan diversas formas de implementación. En este caso, se utilizará un solo sensor para cada uno de los algoritmos: uno para Perturbar y Observar (P&O) y otro para Conductancia Incremental (INC). A partir de esto, se realizarán comentarios generales sobre el comportamiento y análisis de cada método en función de su rendimiento en las simulaciones.

Comentarios sobre el algoritmo P&O: El comportamiento de este algoritmo, según las simulaciones realizadas, presenta varias características distintivas. Una de ellas es el mayor tiempo requerido para alcanzar el Punto de Máxima Potencia (MPP) en comparación con otras técnicas de MPPT, lo cual se debe a la perturbación constante que aplica. Esta perturbación genera fluctuaciones continuas tanto durante la búsqueda del MPP como al encontrarlo, ya que el algoritmo no posee una condición que indique cuando ha llegado al MPP de forma precisa. Por lo tanto, el algoritmo P&O tiende a ser más lento en identificar el MPP y mantiene fluctuaciones constantes en ese punto. Sin embargo, una de sus ventajas es la simplicidad de su implementación, lo que lo convierte en una opción confiable y adecuada para este tipo de sistemas, pese a sus limitaciones en velocidad y estabilidad en el punto de máxima potencia.

Comentarios sobre el algoritmo INC: El comportamiento del algoritmo de Conductancia Incremental (INC), independientemente del sensor empleado, se destaca por su superioridad en varios aspectos. Este algoritmo demuestra ser más confiable y rápido en la identificación del Punto de Máxima Potencia (MPP) en comparación con otros métodos. Su implementación es de bajo costo y, a diferencia del algoritmo P&O, presenta una mínima fluctuación en el MPP. Esto se debe a que el algoritmo INC incluye una condición de búsqueda que le permite determinar con precisión si se encuentra cerca o lejos del MPP, optimizando su capacidad de ajuste. Al comparar este algoritmo con otros métodos, es evidente que el INC sobresale en términos de eficiencia, estabilidad y simplicidad, consolidándose como una de las mejores opciones para la búsqueda del MPP en sistemas de generación de energía hidrocínética.

3.3.3 Conclusión del mejor método

En las simulaciones realizadas, las técnicas MPPT no presentan oscilaciones en la potencia extraíble debido a que están operando en un sistema "ideal". A pesar de esto, se observan algunas pérdidas menores causadas por el rozamiento de los discos en el sistema, lo que resulta en una ligera disminución de potencia. Sin embargo, el verdadero desafío surge cuando se considera la aplicación de estas técnicas en un sistema físico. En este contexto, podrían presentarse problemas debido al desgaste progresivo de los componentes, como la turbina o el PMG.

Las técnicas Cuasi-MPPT, que requieren un conocimiento profundo de la planta (turbina-PMG), tienden a volverse menos efectivas con el tiempo a medida que la planta experimenta deterioro. Este desgaste incrementa la necesidad de mantenimiento, lo que representa una desventaja frente a otros métodos, como los algoritmos tradicionales de búsqueda activa, que no dependen tanto del estado físico de la planta y requieren menor intervención para mantener su eficacia.

Por otro lado, los algoritmos de búsqueda activa tradicionales (P&O, INC) no se ven afectados por el desgaste de la planta, ya que operan continuamente para encontrar el punto de máxima potencia.

Durante el transcurso de esta investigación, se ha reconocido que cada técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) presenta una variedad de beneficios y fortalezas particulares. Sin embargo, algunas técnicas destacan por su capacidad para identificar rápidamente el punto de máxima potencia, así como por su mínima variabilidad y bajo costo de implementación, especialmente en términos de hardware. Considerando estos factores críticos, se puede concluir que la técnica de **Conductancia Incremental**, aplicada a través de la **medición de la frecuencia**, es la más adecuada para sistemas de recolección de energía, como el estudiado. Esta técnica ofrece ventajas significativas en comparación con otras técnicas encontradas en la literatura. La instalación de un frecuencímetro permite clasificarla como una solución sin sensores externos, ya que el dispositivo se integra internamente en la turbina. Esto contrasta con otros sensores que requieren montaje en partes externas de la turbina, lo que puede aumentar la complejidad y los costos del sistema.

Capítulo 4 Conclusiones y futuros trabajos

4 Conclusiones

A partir del análisis de sistemas de energía renovable, como las turbinas hidrocínéticas y sus componentes clave para la extracción de energía eléctrica, se abordó el problema de la intermitencia en el flujo y altura del agua. Este desafío dio lugar al planteamiento de objetivos que justificaron el estudio de las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). A través de simulaciones en un banco de pruebas desarrollado en la plataforma LTSpice, se obtuvieron resultados que contribuyen con originalidad. Las principales conclusiones derivadas de este trabajo son las siguientes:

- **Exploración de la literatura:** Se identificó una notable escasez de información sobre la implementación de técnicas MPPT en sistemas hidrocínéticos. Por ello, se recurrió al análisis de sistemas de cosecha de energía eólica como punto de referencia para sistemas micro hidráulicos. Además, se seleccionaron métodos MPPT bajo criterios de baja demanda computacional, complejidad moderada y alta fiabilidad.
- **Banco de pruebas y validación:** Dada la limitada disponibilidad de estudios similares, se diseñó un banco de pruebas inspirado en trabajos previos de la literatura y adaptado al software LTSpice. Este banco de pruebas constituye una herramienta replicable y escalable para investigaciones futuras. Destaca el uso de máquinas de estados en LTSpice, cuya programación es aplicable en microcontroladores, facilitando la transición hacia pruebas físicas.
- **Comparativa de técnicas:** Las técnicas evaluadas mostraron ventajas y limitaciones específicas, destacándose los siguientes hallazgos:
 - Las técnicas Cuasi-MPPT operan consistentemente en el MPP, aunque su desempeño se ve afectado por el deterioro de la planta, lo que incrementa la necesidad de mantenimiento preventivo.

- El algoritmo P&O presenta fluctuaciones al alcanzar el MPP, lo cual puede ser perjudicial. Sin embargo, su bajo costo y facilidad de implementación lo hacen una opción viable en ciertos contextos.
- El algoritmo de conductancia incremental con medición de frecuencia eléctrica se destacó como la técnica más eficiente, confiable y de menor complejidad. Su clasificación como "libre de sensores" refuerza su potencial para maximizar la recolección de energía en sistemas hidrocínéticos, destacándose como la opción más prometedora para aplicaciones prácticas.
- **Objetivo general:** Se ha estableció un estudio comparativo de técnicas MPPT para sistemas de cosecha de energía hidráulica, cumpliendo así con el principal objetivo de esta investigación y siendo este una aportación original.

4.1 Trabajos a futuro

A pesar de los avances logrados en este estudio, existen áreas adicionales que requieren investigación y desarrollo para mejorar aún más la eficiencia y la viabilidad de los sistemas de generación de energía a partir de microturbinas hidrocínéticas. Algunos trabajos futuros sugeridos incluyen:

- **Validación Experimental:** Se recomienda llevar a cabo experimentos a escala piloto o en entornos reales para validar los resultados obtenidos mediante simulaciones. Esto permitirá verificar la efectividad de las estrategias de MPPT en condiciones operativas reales y proporcionar datos empíricos para la optimización del sistema.
- **Selección de la Topología del Convertidor:** Investigar y seleccionar la topología de convertidor más adecuada para el sistema, considerando factores como la relación de voltaje, eficiencia, costos y requisitos de control.

- **Análisis de Desempeño:** Evaluar el desempeño del sistema implementado en términos de eficiencia energética, respuesta dinámica, estabilidad y capacidad de seguimiento de la carga.

Al abordar estos trabajos futuros, se espera avanzar hacia la implementación práctica y generalizada de sistemas de generación de energía renovable a partir de microturbinas hidrocinéticas, contribuyendo así al desarrollo sostenible de zonas de interés y al fomento de la energía limpia y accesible para todos.

4.2 Productos académicos

Para obtener el título de maestro en ciencias se requieren diferentes procesos, los cuales se han completado de manera satisfactoria, durante la estancia y desarrollo de esta tesis, así como los objetivos por parte del CONAHCYT, con actividades de retribución social las cuales son:

Retribución social

Participación en el comité organizador local llevando a cabo las actividades como: personal de apoyo de la 3a escuela mexicana de doctorado en electrónica de potencia, realizado del 27 al 29 de septiembre de 2023 en las instalaciones del TecNM/cenidet Cuernavaca, Morelos, 29 de septiembre de 2023.

Asistencia y participación en la 3a escuela mexicana de doctorado en electrónica de potencia en las instalaciones del TecNM/cenidet Cuernavaca, Morelos.

Producto académico

Ponencia del artículo titulado; “Maximum Power Point Tracking Techniques (MPPT) in Renewable Energy Systems for Rural Electrification with Hydrokinetic Turbines” en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA).

Colaboración como coautor del artículo titulado: “Hydraulic Energy Harvesting Systems with Hydrokinetic Microturbines, an Alternative of Energy Generation for Electrification of Rural Houses” donde se contribuyó con un método cuasi MPPT como posible aplicación en un sistema hidrocínético.

Bibliografía.

- [1] SENER, «Relación de Localidades del Componente de Instalación de Sistemas Aislados de Electrificación 2022».
- [2] L. M. Abadie, J. M. Chamorro, S. Huclin, y D.-J. van de Ven, «On flexible hydropower and security of supply: Spain beyond 2020», *Energy*, vol. 203, p. 117869, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117869>.
- [3] Oscar Campos, «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021 a 2035.»
- [4] Ibrahim Wan Ismail *et al.*, «Direct Power Control Method of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Pico-Hydrokinetic River Energy Conversion System», 2020.
- [5] R.-A. Chihaiia, I. Vasile, G. Cîrciumaru, S. Nicolaie, E. Tudor, y C. Dumitru, «Improving the Energy Conversion Efficiency for Hydrokinetic Turbines Using MPPT Controller», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 21, p. 7560, 2020, doi: 10.3390/app10217560.
- [6] I. K. Amin y M. N. Uddin, «MPPT based efficiently controlled DFIG for wind energy conversion system», *Int. Electr. Mach. Drives Conf.*, pp. 1-6, may 2017, doi: 10.1109/iemdc.2017.8002274.
- [7] P. Venkatesan, P. Venkatesan, y S. S. Kumar, «Design and Implementation Wind Power Using Hill Climbing Mppt Algorithm», ene. 2016.
- [8] H. Chaieb y A. Sakly, «A novel MPPT method for photovoltaic application under partial shaded conditions», *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 291-299, ene. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.001.
- [9] Lukin Aleksandr, Galina Demidova, Omar Alassaf, Dmitry Lukichev, Anton Rassolkin, y Toomas Vaimann, «MPPT Algorithms for Wind Turbines: Review and Comparison», *2022 29th Int. Workshop Electr. Drives Adv. Power Electron. Electr. Drives IWED*, ene. 2022, doi: 10.1109/iwed54598.2022.9722597.
- [10] P. J. Ker, M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, y R. Saidur, «A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n.º 5, pp. 3220-3227, jun. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.016.

- [11] C. M. Puertas-Frías, C. S. Willson, y P. A. García-Salaberri, «Design and economic analysis of a hydrokinetic turbine for household applications», *Renew. Energy*, vol. 199, pp. 587-598, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.155>.
- [12] C. Sánchez, «TURBINAS HIDROKINÉTICAS UNA ALTERNATIVA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA», vol. 2, p. 10, dic. 2016.
- [13] J. Manwell, J. Mcgowan, y A. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2009. doi: 10.1002/9781119994367.
- [14] R. Vennell, «Exceeding the Betz limit with tidal turbines», *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 277-285, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.016>.
- [15] C. Cardona, J. Sierra, E. Chica, y D. Hincapié-Zuluaga, «Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura», *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 09, pp. 180-197, jun. 2018, doi: 10.24850/j-tyca-2018-03-08.
- [16] Hui Li, H. Li, Zhe Chen, Z. Chen, H. Polinder, y H. Polinder, «Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, n.º 1, feb. 2009, doi: 10.1109/tec.2008.2005279.
- [17] M. Pinilla, M. Pinilla, Sergio Martínez, S. Martinez, 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.
- [18] Chinthagumpala Prasanna, Kalagotla Chenchireddy, Nimmala Gayathri, Pathkula Jayanth, Penchikala Kranthi Kumar, y Vangala Praveen Kumar, «Dynamic Power Optimization and Tracking Control for Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Wind Energy Harvesting», *2023 Int. Conf. Sustain. Commun. Netw. Appl. ICSCNA*, 2023, doi: 10.1109/icscna58489.2023.10370619.
- [19] J. P. Mesa Beleño, «Simulación y análisis de turbinas hidrocínéticas y generadores de imanes permanentes en una microrred: modelación, impacto eléctrico y análisis económico aplicado al caso colombiano», Escuela de Ingenierías, 2020.
- [20] M. C. Akkaya *et al.*, «MPPT Based Adaptive Control Algorithm for Small Scale Wind Energy Conversion Systems with PMSG», *2019 Int. Aegean Conf. Electr. Mach. Power*

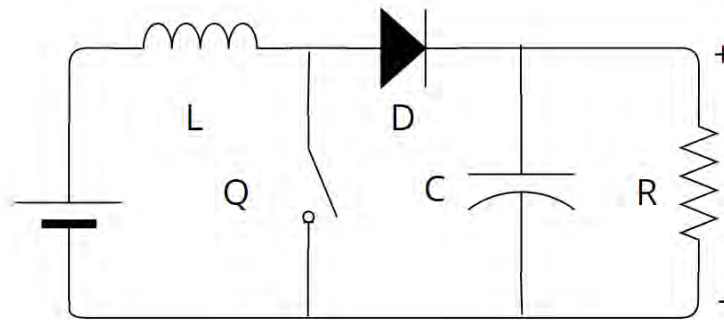
- Electron. ACEMP 2019 Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip. OPTIM*, vol. 2019, pp. 517-522, ago. 2019, doi: 10.1109/acemp-optim44294.2019.9007135.
- [21] I. Hernández, J. Arau, y M. Rico, «Elaboración propia», 15 de mayo de 2023.
- [22] R. Aubree, «PhD ThesisSmall wind turbine turbine sensorless control strategy», nov. 2014.
- [23] Farzia Karim, Md. Faruk Hossain, y Md Shahabul Alam, «MODIFIED HILL CLIMB SEARCHING METHOD FOR TRACKING MAXIMUM POWER POINT IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS», 2011.
- [24] L. C. Correa, J. M. Lenz, C. G. Ribeiro, J. G. Trapp, y F. A. Farret, «MPPT for Magnus wind turbines based on cylinders rotation speed», *Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 462-467, oct. 2013, doi: 10.1109/cobep.2013.6785156.
- [25] J. S. Thongam y M. Ouhrouche, «MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems», jul. 2011, doi: 10.5772/21657.
- [26] 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», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 137-145, feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.08.019.
- [27] A. Kadri, H. Marzougui, y F. Bacha, «MPPT control methods in wind energy conversion system using DFIG», *Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol.*, pp. 1-6, dic. 2016, doi: 10.1109/ceit.2016.7929115.
- [28] S. Brusca, F. Famoso, A. Galvagno, R. Lanzafame, S. Mauro, y M. Messina, «Wind Turbine Wake Mathematical Models Validation by Means of Wind Field Data», *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, ene. 2017.

Anexo A

Algunos convertidores 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.

Convertidor CD/CD de topología elevadora (Boost Converter).

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.



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.

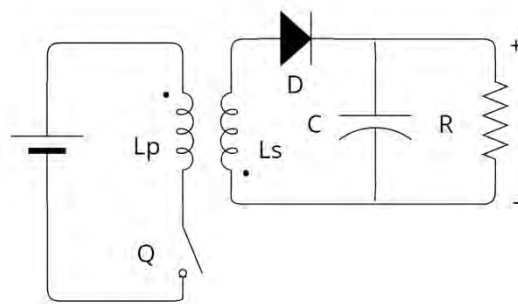
Convertidores con aislamiento

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 protecciones por cuestiones de seguridad.

En la siguiente Figura, se muestra un ejemplo de un 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