

© Jorge Luis Rosero Beltrán, 2012

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Tecnologías de la Información

Programa de Graduados



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**ESTRATEGIA DE CONTROL DE MODELO PREDICTIVO PARA
EL DESPACHO Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
RENOVABLE EN SISTEMAS HÍBRIDOS**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO

ACADÉMICO DE:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
AUTOMATIZACIÓN**

POR:

ING. JORGE LUIS ROSERO BELTRÁN



Vicenç Puig Cayuela, responsable del grupo de Sistemas Avanzados de Control (SAC) de la UPC

HAGO CONSTAR:

Por medio de la presente informo que mi valoración de la tesis de máster realizada por **Jorge Luis Rosero Beltrán**, alumno del programa de Maestría en Automatización, del Tecnológico de Monterrey, durante su estancia de investigación en nuestra institución, del 01 de febrero de 2012 al 31 de julio del 2012 es extremadamente positiva.

La tesis se ha realizado en el grupo de Sistemas de Avanzados de Control (SAC) trabajando bajo mi supervisión y del Dr. Jordi Riera, reconocido experto en temas de gestión energética. El tema de investigación de Jorge se enfoca al desarrollo de nuevos métodos de optimización y control de smart grids.

Como productos de esta tesis se han desarrollado una herramienta de software de simulación/optimización en Matlab/Simulink para la gestión. Adicionalmente se tiene planeado la realización de un artículo para enviarse a un congreso internacional de la especialidad.

Y para que así conste, a petición de la persona interesada, firmo la presente carta.

En Barcelona, a 22 de noviembre del dos mil doce.

Vicenç Puig Cayuela

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Tecnologías de la Información

Programa de Graduados

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la presente tesis del Ing. Jorge Luis Rosero Beltrán sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de **Maestría en Ciencias con especialidad en Automatización**

Comité de Tesis:

Dr. Luis Eduardo Garza Castañón
Asesor

Dr. Francisco Palomera Palacios
Sinodal

MSc. Luis Rosas Cobos
Sinodal

Dr. Gerardo Antonio Castañón Ávila
Director de la Maestría en Ciencias
especialidad en Automatización

Diciembre, 2012

**ESTRATEGIA DE CONTROL DE MODELO PREDICTIVO
PARA EL DESPACHO Y ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA RENOVABLE EN SISTEMAS HÍBRIDOS**

por

Ing. Jorge Luis Rosero Beltrán

TESIS

Presentada al Programa de Graduados de la
Escuela de Ingeniería y Tecnologías de la Información
como requisito parcial para obtener el grado académico de

Maestría en Ciencias

especialidad en

Automatización

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

Campus Monterrey

Diciembre, 2012

Este trabajo es la culminación de una importante etapa de formación personal y profesional, y lo quiero dedicar con mucho cariño a quienes han sido mi fuente de inspiración, mis padres Héctor y Rosita, y mis hermanos, Marco, Geovanny, Patricio y Mauricio, quienes con su infinito amor, ejemplo, comprensión y sabiduría han sabido guiarme por el camino del bien.

Agradecimientos

Quiero dar gracias a Dios por darme la salud y la vida, permitiéndome cumplir cada uno de mis sueños y anhelos.

A mis padres y hermanos, que siempre me brindaron su apoyo incondicional y nunca dejaron de creer en mi.

A mis tíos Jorge y Lucila, por haber depositado toda su confianza en mi, y de manera especial a mi prima Wilmita por su inagotable apoyo y ayuda.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Luis Eduardo Garza Castañón, por su asesoría en este trabajo de investigación y por brindarme la oportunidad de realizar una estancia de investigación internacional.

A la Universidad Politécnica de Catalunya y al Instituto de Robótica e Informática Industrial, de manera muy especial al Dr. Vicenç Puig Cayuela y al Dr. Jordi Riera Colomer, por haber invertido muchas horas de su valioso tiempo a la realización de este trabajo de investigación, y haber compartido con paciencia y humildad gran parte de su conocimiento.

Al Gobierno Ecuatoriano a través de la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT, por financiar este programa de maestría.

Al Ilustre Municipio del Cantón Quero, por ser la entidad auspiciante de mi Beca, de manera especial al Señor Alcalde el Dr. Raúl Gavilanes y al Señor Procurador Síndico el Dr. Lenin Naranjo.

Al Gobierno Mexicano a través del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por su apoyo económico.

Finalmente y no menos importante, a mis amigos Ismael Minchala, Jhony Calderon, Kike Cuan, Rubén Marbán, Jorge Claros, Deneb Robles, Mario Hernández, Marissa Campa, Jonatan Avilés, Jaime Meza, y a todos con quienes tuve la oportunidad de compartir grandes momentos tanto en Monterrey como en Barcelona.

ESTRATEGIA DE CONTROL DE MODELO PREDICTIVO PARA EL DESPACHO Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA RENOVABLE EN SISTEMAS HÍBRIDOS

Jorge Luis Rosero Beltrán, MSc.

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY, 2012

Asesor de tesis: Dr. Luis Eduardo Garza Castañón

Resumen

Actualmente la energía eléctrica es generada por fuentes que consumen combustibles fósiles y/o energía nuclear, con los consecuentes riesgos y daños al medio ambiente que esto representa. El aumento en los precios internacionales del petróleo y su inevitable agotamiento, la demanda de grandes cantidades de energía y el envejecimiento de las redes actuales, han hecho que en los últimos años se de un importante impulso y desarrollo a la generación de electricidad basada en fuentes renovables de energía que ha permitido incrementar de manera exponencial su aporte a nivel mundial.

Los sistemas híbridos de energía renovable combinan fuentes de generación de diferente naturaleza, como la solar y eólica, y dispositivos de almacenamiento, tales como baterías o hidrógeno. Los perfiles de generación de estas fuentes son variables e impredecibles y dependen de las condiciones climáticas y de su tecnología, las cuales al sumarse permiten abastecer casi de manera uniforme la demanda de energía. La función que cumplen los dispositivos de almacenamiento, es compensar esa ausencia o exceso de energía de tal manera que el suministro no se vea interrumpido hacia la carga.

En esta tesis se presenta una estrategia de control de modelo predictivo para el despacho y almacenamiento de energía renovable, la misma que permite determinar de manera anticipada las señales de control que van hacia los convertidores de energía conectados a la red. Con el objetivo de mostrar las bondades y alcances del algoritmo propuesto, se plantean tres escenarios de simulación, los cuales cuentan con los elementos más comunes encontrados en este tipo de sistemas. Los resultados muestran que los sistemas híbridos que poseen un solo tipo de dispositivo de almacenamiento, requieren que éste sea de un tamaño extremadamente

grande para absorber las fluctuaciones de generación y demanda. Por otro lado en cambio, en los sistemas híbridos que incluyen un mayor número de fuentes de generación y dispositivos de almacenamiento, el tamaño de estos últimos se ve reducido aproximadamente en 6 veces su tamaño y unas 20 veces su costo. Finalmente, los sistemas híbridos que disponen de conexión a la red pública, ven reducidos sus dispositivos de almacenamiento en un 75 % con respecto al caso anterior, aunque su costo apenas se reduce en un 20 %, pero con la ventaja de contar con un suministro eléctrico altamente confiable.

Índice general

Abstract	VIII
Índice de tablas	XIII
Índice de figuras	XIV
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	1
1.2. Motivación y Justificación	4
1.3. Definición del Problema	4
1.4. Objetivos	4
1.5. Alcance y Limitaciones	5
1.6. Organización de Capítulos	5
Capítulo 2. Smart Grids	6
2.1. Introducción	6
2.2. Características	10
2.2.1. Cambio Climático	10
2.2.2. Administración de Carga y Control de Demanda	11
2.2.3. Sistemas de Medición Inteligente	11
2.2.4. Sistema de Comunicaciones	12
2.2.5. Seguridad y Calidad	13
2.2.6. Sistemas de Control y Dispositivos Inteligentes	13
2.3. Fuentes de Energía	14
2.3.1. Carbón	14
2.3.2. Gas Natural	16
2.3.3. Petróleo	17
2.3.4. Energía Nuclear	18
2.3.5. Energía Eólica	19
2.3.6. Energía Solar	20
2.4. Formas y Dispositivos de Almacenamiento	20
2.4.1. Baterías	21
2.4.2. SuperCapacitores	23
2.4.3. Bombeo de Agua	23

2.4.4. Vehículos Eléctricos	24
2.4.5. Superconductores Magnéticos	24
2.4.6. Hidrógeno	24
2.4.7. Flywheel	25
2.4.8. Gas Comprimido	25
Capítulo 3. Control de Modelo Predictivo	27
3.1. Introducción	27
3.2. Características del MPC	28
3.3. Ventajas y Desventajas del MPC	29
3.4. Modelo en Espacio de Estados	30
3.5. Restricciones	30
3.5.1. Restricciones de Control	30
3.5.2. Manipulación Diferencial	31
3.5.3. Restricciones de Estado	32
3.6. Función Objetivo	32
3.7. Formulación del Control de Modelo Predictivo	33
Capítulo 4. Modelado del Sistema Híbrido	35
4.1. Sistema Fotovoltaico	35
4.2. Turbina Eólica	41
4.3. Conversores de Energía	44
4.4. Dispositivos de Almacenamiento	45
4.5. Balance Energético	47
4.6. Demandas	48
Capítulo 5. Experimentación y Resultados	50
5.1. Introducción	50
5.2. Escenario 1: Sistema Aislado	51
5.2.1. Generación	51
5.2.2. Algoritmo de Control	52
5.2.3. Parámetros de Simulación	54
5.2.4. Resultados	55
5.3. Escenario 2: Sistema Aislado Ampliado	58
5.3.1. Generación	59
5.3.2. Algoritmo de Control	60
5.3.3. Parámetros de Simulación	61
5.3.4. Resultados	62
5.4. Escenario 3: Sistema Conectado a la Red Pública	68
5.4.1. Generación	68
5.4.2. Algoritmo de Control	69
5.4.3. Parámetros de Simulación	71
5.4.4. Resultados	72

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro	78
6.1. Conclusiones	78
6.2. Trabajos Futuros	80
Anexo A. Formulación Matemática de un MPC	81
Anexo B. Código Fuente MPC	83
Bibliografía	89
Vita	96

Índice de tablas

4.1. Factor A y tipo de tecnología	37
4.2. Irradiación Solar Promedio Mensual (KWh/m ² /día)	40
4.3. Estimación del valor α para distintos terrenos	43
4.4. Velocidad Promedio Mensual del Viento (m/s)	43
4.5. Valores típicos de rendimiento en estado estable	45
4.6. Potencia Horaria Media Residencial e Industrial (KW)	48
5.1. Potencia de Generación Eólica y Solar	52
5.2. Restricciones del Sistema	54
5.3. Parámetros del Algoritmo de Control MPC	54
5.4. Costo Total del Sistema	55
5.5. Potencia de Generación Eólica, Solar y Térmica	60
5.6. Restricciones del Sistema	62
5.7. Parámetros del Algoritmo de Control MPC	62
5.8. Costo Total del Sistema Híbrido Aislado Ampliado	63
5.9. Potencia de Generación Eólica, Solar y Térmica	70
5.10. Restricciones del Sistema	71
5.11. Parámetros del Algoritmo de Control MPC	72
5.12. Costo Total del Sistema	73

Índice de figuras

2.1. Generación Eléctrica de Estados Unidos en el 2010 [1].	7
2.2. Generación Eléctrica Mundial Neta 2008-2035 (Trillones KWh) [2].	7
2.3. Sistema Eléctrico Convencional de Potencia [3]	8
2.4. Consumo de Energía en EUA, China e India 1990-2035 (Quadrillones de BTU) [2].	9
2.5. Red Smart Grid [4].	10
2.6. Consumo mundial de Carbón, 1980-2035 (QBTU) [2]	15
2.7. Consumo mundial de Gas Natural, 2008-2035 (trillones de pies cúbicos) [2] . .	17
2.8. Consumo de combustible liquido por sector a nivel mundial (millones de barriles por día)[5]	18
2.9. Capacidad de Generación Eléctrica Renovable de Estados Unidos [6].	19
3.1. Trayectorias de control y salida de un MPC	27
3.2. Estructura básica de un MPC	28
4.1. Modelo General de un Panel Solar	36
4.2. Modelo Alternativo de un Panel Solar	37
4.3. Modelo Ideal de un Panel Solar	38
4.4. Modelo Generalizado de un Panel Solar	38
4.5. Modelo Alternativo Generalizado de un Panel Solar	39
4.6. Modelo Ideal Generalizado de un Panel Solar	39
4.7. Irradiación Promedio Mensual	40
4.8. Curva de Potencia de un Aerogenerador de 10KW	42
4.9. Velocidad del Viento Promedio Mensual (m/s)	44
4.10. Conversor de Energía	44
4.11. Almacenamiento de Energía	46
4.12. Topología Básica de Sistema Híbrido	47
4.13. Promedio Mensual de Carga Residencial	49
4.14. Promedio Mensual de Carga Industrial	49
5.1. Sistema Híbrido Aislado	51
5.2. Perfil de Generación Eólica y Solar	52
5.3. Aporte de Energía Eólica y Solar	55
5.4. Costo por Tipo de Fuente de Generación	56

5.5. Estado Mensual de Carga de la Batería	56
5.6. Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías	57
5.7. Frecuencia del Estado de Carga	57
5.8. Sistema Híbrido Aislado Ampliado	58
5.9. Perfil de Generación Eólica, Solar y Térmica	59
5.10. Aporte de Energía en Sistema Híbrido Aislado Ampliado	63
5.11. Costo por Tipo de Fuente de Generación	64
5.12. Distribución Anual del Estado de Carga del Banco de Baterías	64
5.13. Estado de Carga del Banco de Baterías	65
5.14. Señales de Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías	65
5.15. Frecuencia del Estado de Carga Sistema Híbrido Aislado Ampliado	66
5.16. Distribución Anual del Nivel del Tanque de Hidrógeno	66
5.17. Nivel del Tanque de Hidrógeno	66
5.18. Señales de Manipulación del Electrolizador y la Pila de Combustible	67
5.19. Frecuencia del Nivel del Tanque de Hidrógeno Sistema Híbrido Aislado Ampliado	67
5.20. Sistema Conectado a la Red Pública	69
5.21. Perfil de Generación Eólica, Solar y Red Pública	69
5.22. Aporte de Energía en Sistema Conectado a la Red Pública	72
5.23. Costo por Tipo de Fuente de Generación	74
5.24. Distribución Anual del Estado de Carga del Banco de Baterías	74
5.25. Estado de Carga del Banco de Baterías	74
5.26. Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías	75
5.27. Frecuencia del Estado de Carga en Sistema Conectado a la Red Pública	75
5.28. Distribución Anual de Nivel del Tanque de Hidrógeno	76
5.29. Distribución Anual de Nivel del Tanque de Hidrógeno	76
5.30. Manipulación del Electrolizador y Pila de Combustible	77
5.31. Frecuencia de Nivel del Tanque de Hidrógeno	77

Capítulo 1

Introducción

1.1. Estado del Arte

En la actualidad la gran mayoría de dispositivos, equipos, artefactos, maquinaria, medios de transporte, construcciones, etc., funcionan o fueron construidos usando energía eléctrica y gracias a ellos se dispone de las comodidades que la vida moderna demanda, convirtiendo a esta forma de energía en indispensable y en muchos casos vital, a tal punto que sería muy difícil imaginar un mundo sin ella. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles altamente contaminantes y su inevitable agotamiento, el incremento de sus precios, el creciente ritmo de demanda de energía y muchos otros factores, han hecho que se desarrollen nuevos tipos de combustibles para su generación, que sean más amigables con el medio ambiente, abundantes en nuestro planeta, económicos, sustentables y de fácil transformación, como es el caso de las fuentes renovables de energía.

Estas fuentes de energía, tales como la solar y la eólica, son las que mayor crecimiento tecnológico han tenido en los últimos años, pero aún presentan algunas limitantes relacionadas directamente con su naturaleza. Las fuentes de energía renovable solar y eólica basan su capacidad de generación eléctrica, en la irradiación proveniente del sol y la cantidad y velocidad de viento, respectivamente, debido a que las mismas dependen directamente de las condiciones climáticas reinantes en la zona donde están instaladas; además, las limitantes físicas de los dispositivos y equipos, hacen que la cantidad de energía generada se vuelva impredecible, variable e intermitente, siendo esto uno de los mayores retos a superar cuando se usa este tipo de tecnología.

Para solucionar en cierta manera estos inconvenientes, en la actualidad se diseñan Sistemas Híbridos de Energía Renovables, los cuales combinan distintas formas de generación y dispositivos de almacenamiento, que permiten administrar la cantidad de energía que se guarda y despacha hacia las cargas, dependiendo de su disponibilidad y consumo [6], que permitan ofrecer un servicio continuo, con energía confiable, limpia, y económica, garantizando la disponibilidad de la misma ante condiciones de operación bajo eventos específicos de condiciones climáticas.

Varios son los aspectos y problemas que deben ser tomados en cuenta con los sistemas

híbridos de energía renovable cuando de controlarlos, dimensionarlos y optimizarlos se trata. Por ejemplo, encontrar el balance óptimo entre operación, confiabilidad, inversión inicial y a largo plazo, tamaño, cantidad y características de los equipos, tiempo de vida útil, calidad de energía generada y factibilidad, entre otros. Estos aspectos requieren de estudio para arrancar con proyectos de instalación de este tipo de tecnología. Algunos de ellos han sido abordados por varios autores por medio del uso de software comercial [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. En la actualidad el uso de herramientas computacionales y específicamente el uso de algoritmos de optimización para resolver este tipo de problemas ha crecido exponencialmente [17, 18], gracias a sus ventajas que se reflejan en el incremento de la eficiencia, aumento del tiempo de vida útil de baterías y demás dispositivos involucrados, que representa entre un 26 y 40 % comparado con sistemas fotovoltaicos únicamente [18].

Una amplia variedad de algoritmos de optimización han sido usados para resolver problemas de dimensionamiento y despacho de energía; Belfkira et al. [19], usan una técnica de optimización global determinística, conocida como DIRECT (DIviding RECTangles), que es usada para encontrar el mínimo de una función continua de Lipschitz y que permite de esta manera minimizar el costo del ciclo de vida del sistema . En cambio en Ekren et al. [20], presentan un método de dimensionamiento de un sistema híbrido formado por paneles solares, turbinas eólicas y baterías, usando un algoritmo de recocido simulado y como objetivo la minimización del costo de la energía del sistema, obteniendo como resultado una mejora del 10.13 % con respecto a la optimización heurística ejecutado en el mismo trabajo.

Haghi et al. [21], presentan un procedimiento de simulación híbrida usando optimización por enjambre de partículas embebido en una simulación MonteCarlo. El sistema consiste en generadores eólicos, celdas de combustible, electrolizadores, reformadores, un reactor anaeróbico y algunos tanques de hidrógeno; el objetivo es minimizar los costos totales del sistema vistos desde la incertidumbre del generador eólico , mientras que Zhang et al. [22], plantean un algoritmo mejorado de enjambre de partículas que permite encontrar los máximos globales, a diferencia del algoritmo normal que únicamente encuentra máximos locales, sobre un sistema híbrido formado por paneles solares, turbinas eólicas, generador diesel y baterías, concluyendo que el sistema opera mejor económica y eficientemente. Hameed et al. [23] se plantea una nueva técnica llamada optimización por enjambre de partículas en espacio abierto, que combina las fortalezas del algoritmo tradicional con la precisión de la técnica de gradiente, sobre un sistema híbrido formado por paneles solares, turbinas de viento y baterías, donde la función objetivo minimiza el costo total sujeto a restricciones del tamaño físico del sistema, en términos de número de elementos.

Lingfeng et al. [24], desarrollan un algoritmo multiobjetivo de enjambre de partículas sobre un sistema híbrido formado por paneles solares, turbinas eólicas y baterías con conexión a la red pública. El objetivo de diseño son el económico, la confiabilidad del servicio y la emisión de gases contaminantes. Mientras tanto Zeng et al. [25] desarrollan un algoritmo genético mejorado para optimizar la operación de un sistema híbrido durante su ciclo de vida;

el sistema consiste de paneles solares y turbinas eólicas como fuentes primarias de energía y baterías como dispositivos de almacenamiento. Los resultados de la simulación permiten concluir que este algoritmo tiene mejor convergencia en velocidad y precisión que los algoritmos genéticos estándar. Katsigiannis et al. [26] presentan la combinación de dos técnicas de optimización llamadas recocido simulado y búsqueda tabú, combinando las mejores características de cada uno de ellos, para hacer el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de energía renovable. La función objetivo minimiza el tamaño de los elementos del sistema y la estrategia de despacho, obteniendo mejores resultados en términos de calidad y convergencia comparados con los resultados de los algoritmos individuales.

Alsayed et al. [27] presentan un dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de energía renovable basado en un análisis de decisión multicriterio, usando la técnica TOPSIS que se basa en que la mejor alternativa debería tener la menor distancia desde la solución ideal positiva. Se obtiene como resultado que este método es confiable y simple para ser implementado de acuerdo a las necesidades, considerando el comportamiento dinámico de los paneles solares, turbinas eólicas y las variaciones de las variables naturales. Además, Xiaolei Hu et al. [28] presentan un algoritmo de control MPC con optimización cuadrática para controlar el despacho de energía en un sistema híbrido, cuyo objetivo es reducir la intermitencia en la carga y descarga de las baterías y supercondensadores.

Muchos de estos trabajos optimizan el nivel de los dispositivos de almacenamiento dentro de los rangos mínimos y máximo permitidos por cada uno, sin embargo, en esta tesis se define un índice de rendimiento que penaliza el nivel de carga de los dispositivos de almacenamiento cuando estos bajan de un nivel de seguridad, lo que permite minimizar este parámetro y obliga a permanecer sobre este nivel en la medida de lo posible; este índice, es un factor más a optimizar dentro de la función objetivo y es constante durante todo el intervalo de operación.

En esta tesis se define también un factor dentro de la función objetivo, que permite minimizar las variaciones de las señales de control entre cada tiempo de muestreo que se aplican a los actuadores o subsistemas, lo cual permite aumentar la estabilidad del sistema al evitar cambios bruscos en las señales de referencia.

A diferencia de los trabajos presentados anteriormente, donde uno de los factores de la función objetivo es minimizar las señales de manipulación dentro de un rango constante definido por las restricciones de las mismas, en este trabajo se propone que las restricciones de las variables de manipulación puedan ser variables, esto permite definir a priori que valor máximo de energía se desea despachar desde las fuentes de energía controladas y, desde y hacia los dispositivos de almacenamiento.

Además, cabe señalar que los escenarios de simulación considerados corresponden a sistemas que trabajan en un bus de corriente continua, donde los convertidores de energía son los convertidores DC/DC, AC/DC, DC/AC, electrolizadores y pilas de combustible.

Finalmente, en este trabajo se representa el sistema completo en espacio de estados, incluyendo las fuentes de energía, los dispositivos de almacenamiento y la demanda del sistema, todos trabajando sobre un bus de corriente continua. Esto permite manejar datos a priori de la generación de cada fuente y el perfil de consumo dentro de un horizonte de predicción pudiendo determinar con anterioridad la cantidad de energía óptima necesaria a despachar o almacenar, en cada instante de tiempo.

1.2. Motivación y Justificación

Las fuentes de energía renovables, entre ellas la solar y eólica, son abundantes e inagotables sobre nuestro planeta y no generan contaminación, no obstante su conversión en energía eléctrica depende completamente de las condiciones climáticas y su variabilidad, además las limitaciones físicas de los equipos y dispositivos usados para este fin hacen que ésta forma de energía sea impredecible, intermitente y por ende muy difícil de controlar. Para solucionar en gran medida este problema en la actualidad se usan técnicas y dispositivos de almacenamiento, cuya principal tarea es acumular energía en los instantes de mayor producción y suplirla cuando la demanda así lo requiera, agregando un proceso dinámico que puede ser manipulado bajo determinados criterios y estrategias.

1.3. Definición del Problema

Al disponer de fuentes de generación de energía renovable operando junto a dispositivos de almacenamiento para el abastecimiento de energía a una determinada carga, el problema se centra en buscar una estrategia de control que permita optimizar el despacho de la misma, minimizando su costo, alargando el tiempo de vida útil de los equipos y garantizando la disponibilidad del suministro durante los escenarios más críticos.

1.4. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de tesis es diseñar una Estrategia de Control de Modelo Predictivo que permita optimizar y predecir el despacho y almacenamiento de energía en sistemas de generación basados en fuentes de energía renovable, considerando las restricciones físicas y operativas de los elementos involucrados.

Adicionalmente, para cumplir con la meta anterior, se requiere cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología que permita modelar un sistema híbrido de generación de energía eléctrica basado en fuentes de energía renovable conectados a un bus de corriente continua, a través de la representación en espacio de estados.
- Definir una función de costo a ser minimizada, que tenga como argumento el aspecto económico, el nivel de seguridad de carga de los dispositivos de almacenamiento y de estabilidad del sistema.

- Elaborar un escenario de simulación real que permita validar la metodología y el algoritmo propuesto, y que sea factible de comparación con casos similares.
- Analizar los resultados para distintas condiciones de operación y parámetros de simulación.

1.5. Alcance y Limitaciones

El presente trabajo se enmarca dentro de ciertas consideraciones operativas y de comportamiento de algunos elementos, que a continuación se detallan:

- Debido al período de muestreo al cual trabaja el algoritmo de control, el comportamiento transitorio de los convertidores estáticos de potencia son despreciados y se asume que su operación es normal en cualquier instante de tiempo, sin necesidad de aplicar ningún algoritmo de control adicional para su operación.
- La dinámica de los dispositivos de almacenamiento y conversión se consideran lineales y constantes durante el período de simulación, afectados únicamente por su coeficiente de rendimiento.
- Se asume que las fuentes renovables disponibles entregan su máxima potencia de generación, regulados y controlados por sus algoritmos locales o en su defecto por su operación nominal.
- Los perfiles de generación y consumo están disponibles para el horizonte de predicción que demande el algoritmo, sin necesidad de incluir algoritmos adicionales de predicción de condiciones climáticas dentro del modelo propuesto.
- Los escenarios de simulación considerados están formados por sistemas híbridos de energía los mismos que trabajan en topologías cuyo bus de energía es de corriente continua.

Complementariamente, el alcance del presente trabajo es validar la herramienta de software desarrollada, aplicando un algoritmo de Control de Modelo Predictivo para el despacho energía en sistemas híbridos de generación eléctrica, optimizando las señales de manipulación que llegan a los convertidores de manera que se pueda minimizar la Función Objetivo propuesta.

1.6. Organización de Capítulos

Esta tesis se complementa con el Capítulo 2 donde se realiza una introducción a los smart grids, las fuentes de energía y dispositivos de almacenamiento. En el Capítulo 3 se presenta la formulación matemática del algoritmo de control en espacio de estados y el procedimiento para optimización cuadrática, mientras que en el Capítulo 4 se realiza la modelación del sistema híbrido, donde se describe las características de operación de los diferentes elementos involucrados y su función en el sistema. En el Capítulo 5 se presentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones al trabajo realizado y las recomendaciones para el trabajo futuro.

Capítulo 2

Smart Grids

El objetivo de este capítulo es, conocer las diferentes características de las redes inteligentes o smart grids, las fuentes de energía más utilizadas para la generación de electricidad y, las formas y dispositivos de almacenamiento. En la sección 2.1 se presenta una introducción a las redes convencionales de energía eléctrica. En la sección 2.2 se presentan los principales motivos por los cuales es importante el desarrollo de los smart grids. En la sección 2.3 se describen las principales fuentes de energía para la generación eléctrica, y finalmente, en la sección 2.4 se presenta las diferentes formas y dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica.

2.1. Introducción

Un sistema eléctrico de potencia típico, está compuesto por tres grandes subsistemas: Sistema de Generación, Sistemas de Distribución y Sistema de Consumidores; la red actual es fundamentalmente jerárquica y unidireccional, como se aprecia en la Figura 2.3, con bajos niveles de eficiencia (convierte únicamente una tercera parte del combustible consumido en electricidad) y grandes pérdidas en las líneas de transmisión (casi el 8 % de su generación), mientras que un alto porcentaje de esta potencia es usada durante pequeños intervalos de tiempo, solamente para cubrir los picos de demanda (20 % de su generación) [29].

El sistema de generación eléctrico convencional está basado en combustibles fósiles, energía nuclear, gas natural y plantas hidroeléctricas; en los últimos años una pequeña cantidad de energía renovable, proveniente de turbinas eólicas, paneles solares, planta geotérmicas, biocombustibles, biomasa y otras, se han sumando. Según el reporte de la U.S. Energy Information Administration (EIA) [1], la generación eléctrica en Estados Unidos es 69 % basada en combustible fósil, 20 % por energía nuclear, 6 % por energía hidroeléctrica y apenas un 6 % por otras fuentes de energía entre las que se encuentran las renovables, como se aprecia en la Figura 2.1. Por otro lado, de acuerdo al E.I.A. Country Analysis Brief [30], la generación eléctrica en China es aproximadamente 82 % basada en combustible fósil, 16 % del sector hidroeléctrico y 2 % gracias a otras fuentes. Además, el E.I.A. International Energy Outlook 2011 (IEO2011) [2], proyecta que la generación de electricidad neta mundial se incrementará un 84 % en el 2035 con un uso predominante de carbón y gas natural, y un importante desarrollo del sector hidroeléctrico y las energías renovables, como se aprecia en el Figura 2.2.

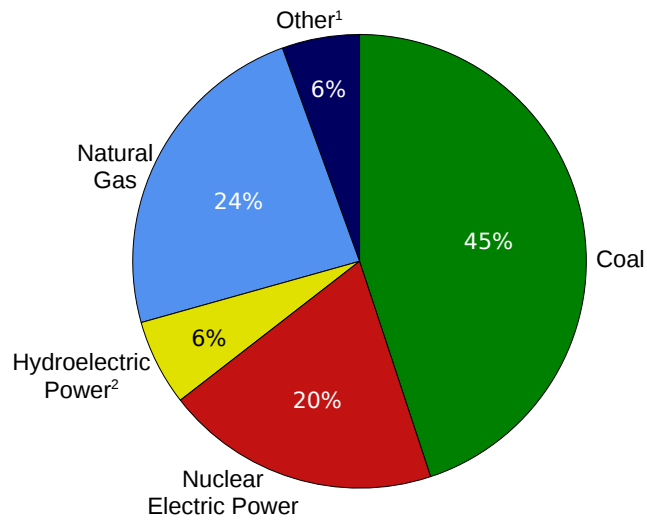


Figura 2.1: Generación Eléctrica de Estados Unidos en el 2010 [1].

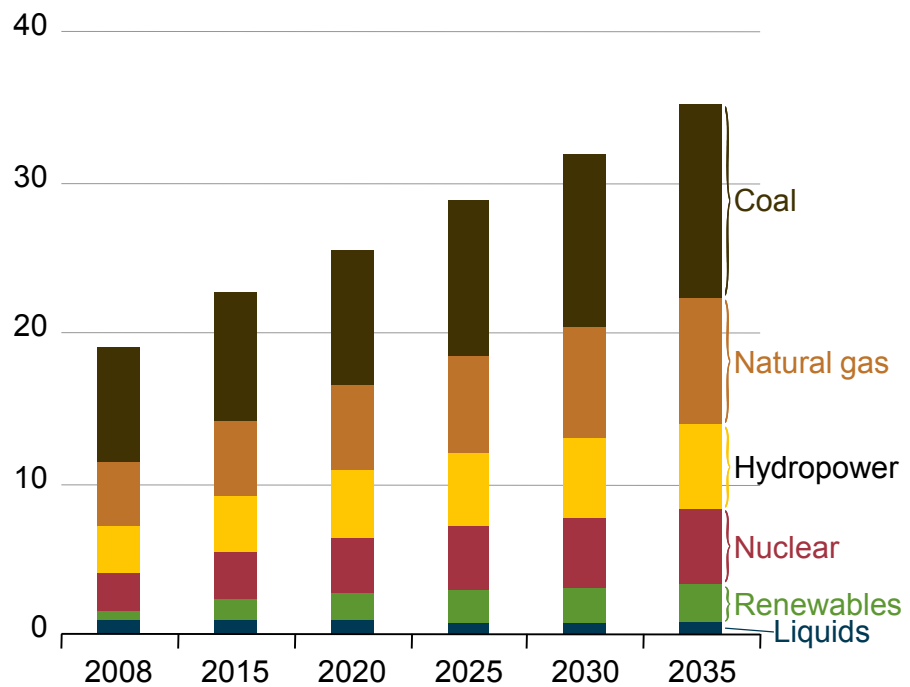


Figura 2.2: Generación Eléctrica Mundial Neta 2008-2035 (Trillones KWh) [2].

El combustible fósil es la principal fuente para generar electricidad, especialmente para China, que es el más grande productor y consumidor de carbón, mientras que Estados Unidos es el mayor productor y consumidor de petróleo [30], así como también más del 50 % de las emisiones de CO_2 son causadas por estos dos países y la Unión Europea [31], convirtiendo a la generación y transporte de electricidad como una de las mayores causas de contaminación

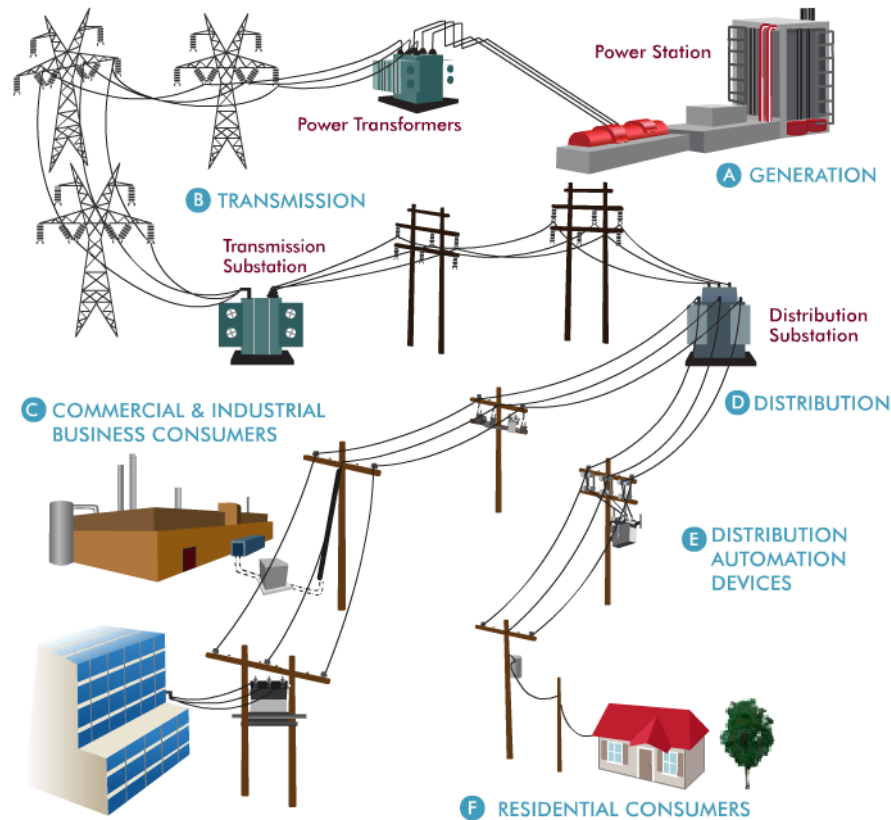


Figura 2.3: Sistema Eléctrico Convencional de Potencia [3]

ambiental. Sin embargo, más del 82 % del incremento en generación de energía renovable ha sido en el sector hidroeléctrico y eólico, siendo China en el 2009, el mayor productor de energía hidroeléctrica y que además actualmente construye la central hidroléctrica "Las tres gargantas" sobre el río Yangtsé, la más grande del mundo, con una potencia instalada de 24GW, es decir, casi el doble que la central hidroeléctrica de Itaipú en Brasil (14 GW) [2].

Por otra parte, el Sistema de Distribución se realiza con ayuda de tres complejos subsistemas, como son: el de transmisión, el de subestaciones y el de despacho, los cuales fueron diseñados y construidos para *llevar* la electricidad desde las centrales de generación hacia los usuarios finales como se ilustra en la Figura 2.3, sin embargo éstos están siendo sometidos a fuertes presiones debido a las condiciones de operación, como las variaciones bruscas de carga, presencia de armónicos y fenómenos naturales, capaces de causar graves daños sobre una red cada vez más deteriorada y sobrecargada, que la convierten en un sistema muy vulnerable hoy en día.

El Sistema de Consumidores, que según proyecciones hechas por la EIA en el IEO2011 [2], muestran que el consumo a nivel mundial aumentará un 53 % para el 2035, donde China y la India serán los que encabezen dicho incremento, con un crecimiento promedio anual de

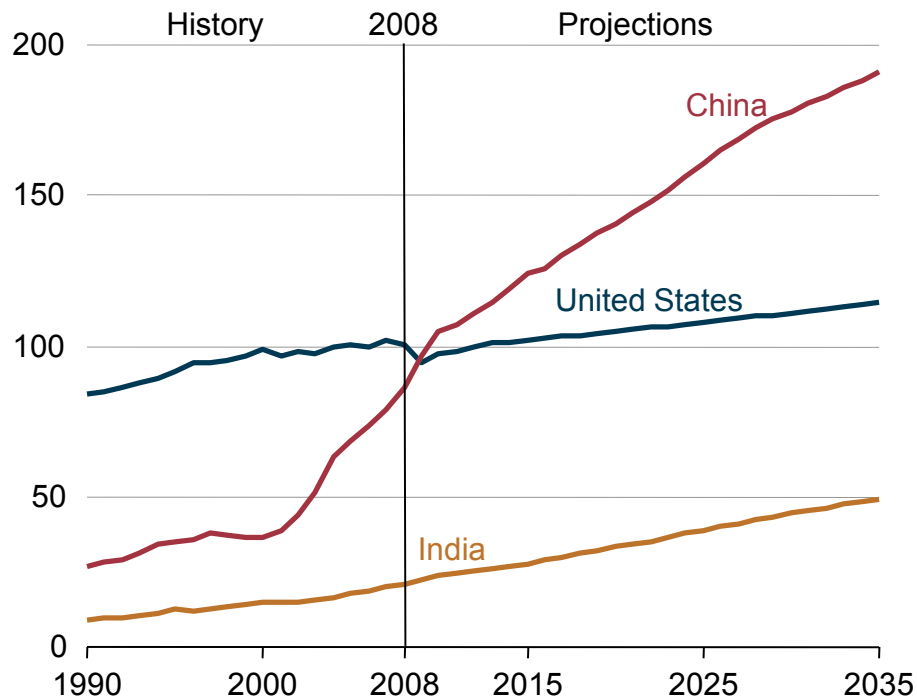


Figura 2.4: Consumo de Energía en EUA, China e India 1990-2035 (Quadrillones de BTU) [2].

2.3 %. Además, estos países hoy en día lideran el crecimiento económico mundial y la demanda de energía, juntos consumieron alrededor del 10 % del total de la energía mundial en 1990 y un 21 % en 2008, mientras que China considera que su consumo ha sobrepasado al de Estados Unidos por primera vez en su historia. Se estima que estas dos naciones consumirán 38 % más energía que el resto de países en el 2020 y 67 % más en el 2035. En la Figura 2.4, las proyecciones muestran que el consumo de energía combinada de China e India será el doble que la de Estados Unidos en el 2035, totalizando un 31 % a nivel mundial.

Finalmente, se proyecta que los actuales y futuros consumidores demandarán cada vez más una gran cantidad de energía, que muchas veces es mal utilizada o desperdiciada debido entre otras cosas, a que éstos no puedan administrar su consumo de energía, convirtiéndose en actores pasivos frente a lo que sucede en los niveles superiores de distribución, sin tener la posibilidad de contribuir a reducir los picos de consumo de energía aunque ellos son los responsables directos de los mismos [4]. Para satisfacer estos requerimientos y retos, muchos países, organizaciones no gubernamentales y el sector privado están trabajando incansablemente por desarrollar e implementar un nuevo concepto del sistema eléctrico actual, denominado redes inteligentes o smart grids, las cuales se convertirán en la siguiente revolución tecnológica de la nueva era.

2.2. Características

Los smart grids integran de manera inteligente sistemas de generación convencional y renovable, consumidores y dispositivos de almacenamiento de distinta naturaleza y tamaño, con el objetivo de conseguir un suministro eficiente, seguro y sostenible. Generalmente la topología de red de este tipo de sistemas es descentralizada, buscando optimizar la gestión activa de demanda y generación, como se ilustra en la Figura 2.5.

Existe una gran variedad de términos para referirse a la nueva generación de las redes convencionales, entre ellos están las redes inteligentes, redes del futuro, entre otras, las cuales han sido usadas para describir esta revolución tecnológica y energética; sin embargo una frase no es suficiente para asimilar un concepto tan amplio y complejo. A continuación se describen los motivos más importantes para su desarrollo, las características fundamentales de su funcionamiento y los retos a alcanzar en los años que vienen, buscando abarcar todas las ramas de la ciencia y la ingeniería que están involucradas en este tema; además, una serie de conceptos y definiciones mundialmente reconocidos son presentados.

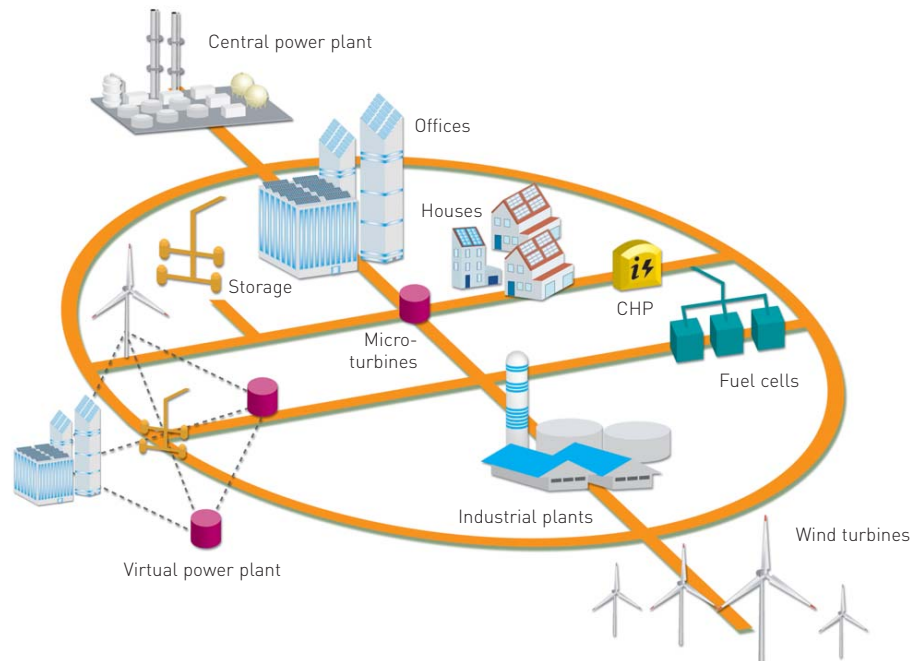


Figura 2.5: Red Smart Grid [4].

2.2.1. Cambio Climático

La generación de una gran cantidad de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables de energía: hidro-eléctricas, eólicas, solares, biomasa y geotermal, así como la implementación a gran escala de fuentes de energía más limpias, como la captura y reducción del carbón en las centrales térmicas, el uso de gas natural y energía nuclear, son necesarias para reducir la

producción de Dióxido de Carbono en la generación de electricidad y el transporte, lo que permitirá mitigar el cambio climático mundial y así alcanzar los objetivos propuestos por el protocolo de Kyoto en el 2005.

La instalación de sistemas de control inteligentes, dispositivos y aplicaciones, tales como sistemas avanzados de medición y sistemas de administración energética domésticos, junto a los sistemas de generación distribuida basado en fuentes de energía renovables, sistemas de almacenamiento de energía, vehículos híbridos con conexión eléctrica, permitirán a los usuarios administrar el uso de energía más eficientemente y hacer a los sistemas eléctricos más confiables, eficientes y seguros, buscando reducir los gases de efecto invernadero y ofreciendo opciones de energía más sustentables y ambientalmente más amigables [4, 32, 33, 34].

El desarrollo e integración de fuentes de generación distribuida a larga escala, incluyendo fuentes renovables de energía que involucren, parques de generación eólica en áreas remotas o en el mar, instalaciones de paneles solares, plantas termales y la inclusión de celdas de combustible, las cuales actuarán como pequeñas centrales de provisión de energía, con modernos y avanzados sistemas de almacenamiento de energía de varios tamaños, tales como baterías, hidrógeno, super-capacitores, almacenamiento térmico, flywheels, y muchos otros, sumado a vehículos eléctricos que podrían trabajar juntos bajo la supervisión y control de sistemas tecnológicos de control de demanda y reducción de picos, para optimizar la cantidad de energía entregada y administrar la carga y descarga de los dispositivos de almacenamiento dependiendo de las condiciones de operación y garantizando el máximo rendimiento y durabilidad [33, 34, 35, 36, 37]

2.2.2. Administración de Carga y Control de Demanda

El rápido crecimiento de la población mundial y el consecuente incremento en la demanda de energía abundante, sostenible, de alta calidad, eficiente y limpia, requiere herramientas y dispositivos cada vez más sofisticados e inteligentes que estén constantemente monitoreando el estado de las fuentes de generación, la demanda, el precio y sobre todo que tengan la capacidad de adaptarse a la naturaleza cambiante de las fuentes renovables y al comportamiento dinámico de consumo de los usuarios, con el fin de mitigar o reducir los picos de demanda, las pérdidas y optimizar el suministro de energía, de manera que su costo final sea más bajo.

Además, también se requiere del desarrollo de tecnologías de comunicación, de algoritmos sofisticados de pronóstico y métodos de calendarización que permitan instalar centros de control inteligentes con la capacidad de tomar decisiones cuando ocurran situaciones de congestión, fallas o eventos aleatorios, impidiendo el corte del suministro o en su defecto minimizando su área de impacto [33, 35, 37].

2.2.3. Sistemas de Medición Inteligente

El uso de sistemas avanzados de medición involucran el desarrollo de una gran cantidad de tecnologías paralelas que provean a las empresas eléctricas trabajar con una extensa

gama de sensores capaces de recolectar, almacenar y reportar información de parámetros de consumo: potencia activa, potencia reactiva, voltaje, corriente, frecuencia, demanda, etc., con un nivel de precisión y exactitud aceptable, a través de una comunicación bidireccional y en tiempo real. Esto va a permitir la obtención y entrega de datos tales como, el precio de la energía y el nivel de consumo. De este modo se pueden generar pronósticos tendientes a tomar las acciones de control necesarias para cubrir las necesidades de los consumidores.

La aplicación y desarrollo de esta tecnología implicaría tener la posibilidad de generar reportes de daños en caso de existir alguna deficiencia en el servicio, acceder a datos de consumo en cualquier momento, en cualquier intervalo de tiempo y en tiempo real, contar con datos reales de costos de la energía y sobre todo tener la posibilidad de que los usuarios puedan seleccionar el proveedor del servicio eléctrico en función de los costos y la calidad de energía que cada compañía es capaz de entregar, además de permitir elegir entre varias otras opciones [29, 37].

2.2.4. Sistema de Comunicaciones

Desde la generación a la transmisión y la distribución, la tecnología de los smart grids se espera que cambie todos los campos del sistema eléctrico actual. Las tecnologías de información y comunicaciones son las llamadas a resolver el gran problema de la gran cantidad de datos que se generaran por un enorme número de sensores en instalaciones de distribución y transmisión, sincro fasores, sistemas SCADA, sistemas de respaldo, sensores inteligentes, dispositivos inteligentes y sensores instalados en toda la red.

Un análisis de datos en tiempo real, intercambio y procesamiento de esta información entre diferentes actores en la red será necesario en el futuro. La generación, transmisión, despacho y consumo, todos unidos por una red rápida, confiable, segura y moderna, es el reto para las futuras redes, de manera que permitan a los sistemas y dispositivos de control, trabajar eficientemente para proveer a los usuarios con un servicio de calidad que este acorde con los estándares internacionales [4, 32, 35].

A pesar de la semejanza en el concepto entre redes de telecomunicaciones con las redes eléctricas, existen restricciones que están presentes en estas últimas. Mientras en las redes de telecomunicaciones, en las cuales se redireccionan paquetes de información, en las redes eléctricas se redireccionan flujos de energía que están restringidos por leyes físicas. Por ejemplo, un sistema SCADA que controla las subestaciones o la centrales de generación, tienen requerimientos de latencia de medición del orden de milisegundos y las consecuencias de una falla de envío de una acción de control puede ser catastrófica [32, 33].

Los sistemas de control requieren el intercambio de información entre ellos, con los dispositivos inteligente domésticos, con los sistemas de administración de energía, vehículos eléctricos, etc., por lo tanto es esencial y necesario definir estándares, representaciones, y protocolos

para el transporte de datos para este tipo de sistemas complejos de manera que permita una comunicación horizontal y vertical de los diferentes actores con las respectivas medidas de seguridad y aplicaciones [32, 34].

2.2.5. Seguridad y Calidad

La fuerte interdependencia de internet, la banca y finanzas, los sistemas de transporte, almacenamiento de alimentos, redes de agua, la economía digital y muchos otros, dependen de la seguridad, flexibilidad y robustez de la energía eléctrica. Desarrollar y mejorar la red contra ataques maliciosos en línea, físicos y terroristas, a través de mejores políticas gubernamentales y cyber seguridad, para mantener la integridad física de la red y las base de datos de información confidencial y autenticidad, evitará daños catastróficos en cascada que podrían afectar la seguridad global, la economía y el estilo de vida de todos los ciudadanos alrededor del mundo [38, 39].

Además, esto va a incrementar la flexibilidad y a mejorar la confiabilidad y recuperación ante fallos de componentes, envejecimiento y fenómenos naturales tales como huracanes, terremotos y otros desastres impredecibles minimizando la frecuencia y magnitud de cortes de energía, añadiendo sistemas inteligentes auto-recuperables y tolerantes a fallos, para aumentar la calidad del servicio y ofrecer a los usuarios seguridad y calidad de energía, sujeto a políticas de regulación, requerimientos operativos, limitaciones de equipos, preferencias de clientes y económicas [38, 35, 40].

2.2.6. Sistemas de Control y Dispositivos Inteligentes

Los avances en tecnología inteligente, orientada a los sistemas eléctricos, con optimización dinámica y con algoritmos para la administración del despacho que enlacen la información de la demanda de los usuarios y la respuesta a la demanda, con la operación de los electrodomésticos y los perfiles de generación que incluyan fuentes de energías convencionales y renovables son claves para hacer este proceso más manejable y controlable, reduciendo los apagones y el tiempo de reparación, manteniendo los niveles de voltaje y mejorando la gestión de activos [32, 36].

Todas estas características y los retos a alcanzar son fundamentales para entender la importancia de los smart grids en el desarrollo de la sociedad en los años siguientes. De acuerdo a la European Energy Platform [4], un smart grid es definido como sistema radial con la presencia de generación distribuida y energías renovables en diferentes ubicaciones, que junto a dispositivos de almacenamiento y sistemas de control de demanda puedan optimizar el consumo de la misma.

De acuerdo al U.S. Department of Energy un smart grid usa tecnología digital para mejorar la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia (tanto económica como energética) del sistema eléctrico desde las fuentes de generación, pasando por los sistemas de transmisión y

distribución, hasta los consumidores finales, con un gran crecimiento en el número de fuentes de generación distribuida y dispositivos de almacenamiento [41].

Según la International Energy Agency un smart grid es una red eléctrica que usa tecnología digital y otros avances para monitorear y administrar el transporte de la electricidad desde las fuentes de generación para cubrir una demanda de los consumidores finales. Los Smart Grids coordinan las necesidades y las capacidades de los generadores, las operaciones de la red, el mercado de los distribuidores y consumidores para operar el sistema de la manera más eficiente, minimizando los costos y el impacto ambiental mientras maximiza la confiabilidad, estabilidad y flexibilidad de la red completa [37].

2.3. Fuentes de Energía

2.3.1. Carbón

De consistencia sólida, generalmente de color negro o café, con un 50 % en peso o 70 % en volumen de materia carbonosa, producida por la compactación y endurecimiento de residuos vegetales que vivieron y murieron hace aproximadamente 400 millones de años, el carbón es actualmente la fuente de energía más abundante sobre el planeta y sin lugar a duda, como el combustible fósil de mayor historia e importancia en el desarrollo de la humanidad, el mismo que ha sido usado desde épocas prehistóricas como fuente de calor y en la actualidad principalmente como combustible para la generación de energía eléctrica [42, 43].

La llegada de la revolución industrial jugó un papel muy importante en el desarrollo y consumo de éste combustible, en 1769 James Watt patentó la máquina a vapor, un revolucionario invento que usaba carbón para producir vapor y con él generar movimiento mecánico, que hasta esa fecha era realizado por animales y/o personas [44]. En 1882 Thomas Alba Edison construyó la primera central de generación termo-eléctrica usando carbón para proveer de electricidad a algunos residentes de la ciudad de Nueva York. En 1901, la *General Electric Company* construyó la primera planta termo-eléctrica de corriente alterna en Ehrenfeld, Pennsylvania, para la *Webster Coal and Coke Company*, eliminando los problemas de transmisión a larga distancia que en ese tiempo presentaba la corriente continua [45].

Entre 1970 y 1990 la producción de carbón en Estados Unidos prácticamente se duplicó, pasando de 520 millones a casi 1.1 billones de toneladas, cifra en la cual se mantuvo hasta la crisis mundial en 2009 donde se presentó un ligero descenso [1]. De acuerdo al IEO2011, actualmente el productor y consumidor de carbón más grande del mundo es China, con una producción en 2010 que bordea los 70.5 quadrillones de BTU (QBTU), seguido de lejos por Estados Unidos con 22.6 QBTU; según sus predicciones el consumo mundial de carbón se incrementará en un 50 %, de 139 QBTU en 2008 a 209 QBTU en 2035, como se aprecia en la Figura 2.6, siendo China e India, países que no pertenecen al OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), quienes marquen dicho crecimiento [2].

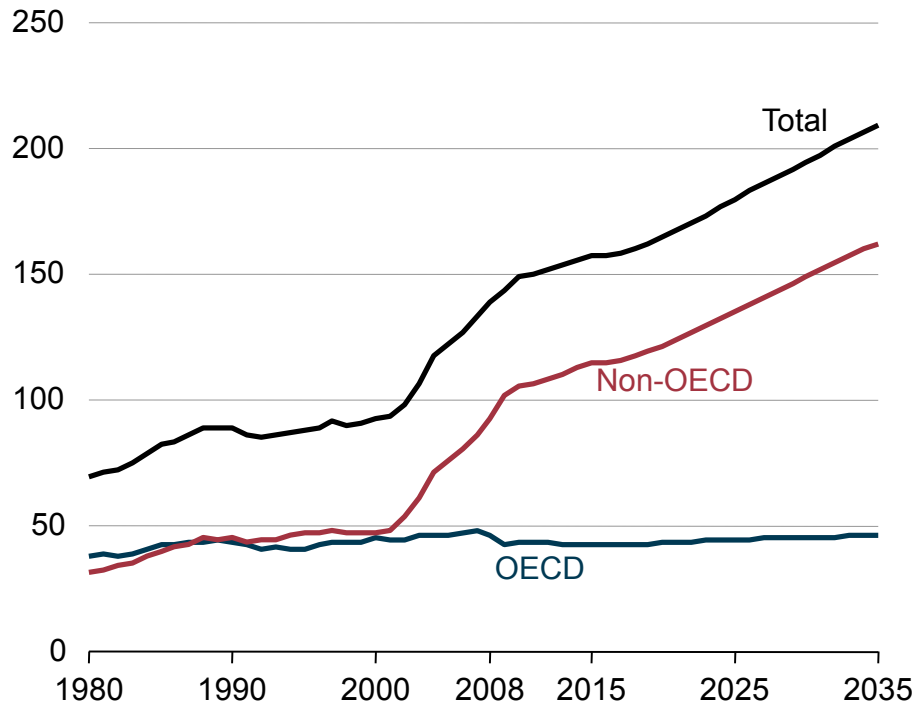


Figura 2.6: Consumo mundial de Carbón, 1980-2035 (QBTU) [2]

Según el World Coal Association [46], el mercado más grande para el carbón actualmente es Asia, con una demanda que supera el 65 % del consumo mundial, especialmente en China donde el aumento en la demanda de energía del sector industrial y eléctrico es cubierto con este combustible; solo en 2009, este país consumió aproximadamente 3.5 billones de toneladas de este mineral, es decir más del 46 % del consumo mundial, con un incremento de 180 % respecto al año 2000 [30]. Los mayores consumidores de carbón en el mundo son China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón que en conjunto suman un 77 % de la producción mundial [2].

Según el Global Energy Statistical Yearbook 2011, el crecimiento en la producción de carbón en 2010 se mantuvo a una tasa de 5.2 %, donde China alcanzó un crecimiento de 8.9 % principalmente para cubrir su demanda interna. En el mismo año India creció al 3 %, más lentamente respecto al 2009 (8 %), mientras que Estados Unidos el segundo mayor productor de carbón, con un mercado mundial del 15 %, tuvo un ligero decremento de 0.3 %; Indonesia por su parte, creció a un ritmo de 7.3 % (10 % en 2009) y Rusia a un nivel de 5.4 % [47].

El carbón, a nivel mundial, es usado principalmente como combustible para la generación de energía eléctrica, éste representa el 40 % del combustible destinado a dicho propósito. Otros usos del carbón es en el sector industrial, en la producción de acero, procesamiento de cemento, fabricación de papel, industria farmacéutica, entre otros [46]. Se estima que el uso de carbón para la generación eléctrica en China aumente de 28.7 QBTU en 2008 a 63.4 QBTU en 2035, esto significa a una tasa de crecimiento anual de 3.0 % en comparación con Estados Unidos que crecerá a un ritmo de 0.2 % anualmente en este sector [2]. China destina aproximada-

mente el 80 % de carbón para generar un 80 % de energía eléctrica, es decir 2756.8 Billones de Kilowatts-hora (BKW-h) [30]. Estados Unidos por su parte, destina cerca del 92 % de carbón para generar un 45 % de energía eléctrica, lo que representa 1850.7 BKW-h [1].

En cuanto a las reservas, se estima que mundialmente existe un total de 948 billones de toneladas lo que representa 126.3 años de disponibilidad de este combustible, con Estados Unidos a la cabeza con 260.6 billones, seguido por Rusia con 173.1 y China con 126.2, es decir que estos tres países poseen el 59 % de las reservas mundiales de carbón [42][43]. En la actualidad el carbón representa la principal fuente de energía para el mundo, China tiene una dependencia a este combustible en un 71 % [30], mientras que India un 41 % [48], Estados Unidos un 21 % [1] y Rusia un 16 % [49].

2.3.2. Gas Natural

Hidrocarburo gaseoso altamente inflamable que esta compuesto principalmente de metano y etano, incoloro e inodoro y que normalmente se encuentra disuelto en petróleo a muy alta presión denominándolo gas asociado o húmedo; otras veces se lo puede encontrar sólo, es decir, sin estar en contacto con ningún líquido, llamándolo gas no asociado o seco. El gas natural es un combustible fósil que se formó por la descomposición de plantas terrestres y restos marinos hace mas de 300 millones de años y actualmente representa la segunda fuente de energía más abundante del planeta y la de mayor crecimiento [50].

Fue en 1821 en Fredonia, Nueva York cuando William A. Hart taladró un pozo de 27 pies de profundidad en un esfuerzo por obtener un mayor flujo de gas proveniente de una filtración superficial; éste hecho es considerado como el primer pozo intencionalmente taladrado para obtener gas natural en América. Por mucho tiempo el gas fue usado exclusivamente como combustible para iluminación, hasta que en el año 1885, Robert Bunsen inventó el *Quemador de Bunsen*, el cual combinaba gas con aire, permitiendo usarlo cómo calefacción doméstica y como fuente de calor para cocinar [51].

Una de las primeras grandes tuberías de gas fue construida en 1891, con una longitud de 120 millas (193Km), desde los pozos ubicados en Indiana hasta la ciudad de Chicago; sin embargo, no fue sino hasta después de la segunda guerra mundial cuando los avances en industria metalúrgica, nuevas técnicas de soldadura y materiales fueron desarrollados, permitiendo que se construyeran miles de millas de tuberías en Estados Unidos, llevando este combustible a nuevos mercados y convirtiendo hoy en día a esta red en una de las más grandes del mundo, a tal punto que se podría extender hasta la luna, ida y vuelta, dos veces [52].

El gas natural es el combustible fósil de mayor crecimiento con un ritmo anual del 1.6 % desde el 2008 hasta el 2035 como se aprecia en la Figura 2.7. La demanda en los países no-OECD se incrementa casi tres veces más rápido que en los países OECD, con una estimado en su producción para el 2035 del 81 %. El sector eléctrico e industrial juntos suman un incremento en la estimación de consumo de este combustible en un 87 % para el 2035. Irán y

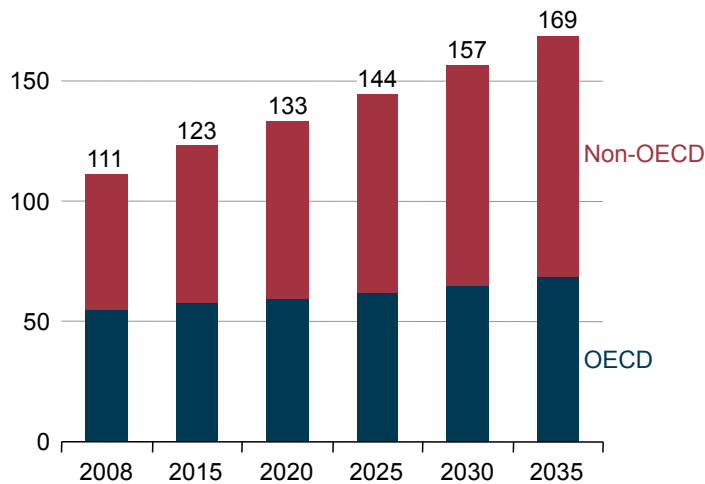


Figura 2.7: Consumo mundial de Gas Natural, 2008-2035 (trillones de pies cúbicos) [2]

Qatar son los países que mayor producción de gas natural tienen actualmente, llegando a una quinta parte de la producción mundial.

Por otro lado, las reservas mundiales han crecido un 50% en los últimos 20 años, superando las reservas de petróleo en el mismo período, con un incremento anual de 3.1% desde 1980. La región que más crecimiento ha tenido en sus reservas ha sido el Medio Oriente, con Irán, Qatar, Arabia y Abu Dhabi a la cabeza. Tres países poseen más del 50% Rusia con 25.2%, Irán 15.7%, Qatar 13.4%, mientras que un total de 20 países poseen el 90.9% de las reservas mundiales [2].

2.3.3. Petróleo

Compleja mezcla de hidrocarburos que se encuentran en forma líquida, gaseosa o sólida. El petróleo se refiere normalmente a la forma líquida o también llamado *crudo*, aunque técnicamente este formado por gas y otros elementos viscosos principalmente azufre. Las fases líquidas y gaseosas, actualmente constituyen la forma de energía fósil más importante del planeta. Su formación es igual que la del carbón y por ende también se lo considera como una fuente de energía no renovable. Los antiguos Sumerios, Asirios y Babilonios, usaron este hidrocarburo hace más de 5000 años A.C. en diversas aplicaciones, mientras que los Egipcios lo usaron con fines medicinales y los Árabes y Persas como armas de guerra [53].

En 1858 el canadiense Miller Williams (1818-1890) perforó el primer pozo petrolero en América y construyó una sencilla refinería para su procesamiento, a la cual llamó *J.M Williams Company* y fue la primera empresa petrolera en América y que posteriormente en 1860 se conocería como la *Canadian Oil Company* [54]. Sin embargo, un año más tarde, el 27 de Agosto de 1859 el estadounidense Edwin L. Drake (1819-1880) perforó un pozo petrolero de 69 pies de profundidad con una innovadora y revolucionaria técnica (que no la patentó) en

Titusville, Pennsylvania siendo éste el punto de partida del *oro negro* en América [55, 56].

En 2010 la demanda de petróleo alcanzó los 86.7 millones de barriles por día y a este ritmo, para el 2035 la demanda será de 99 millones de barriles por día. Sin embargo, si se aplican políticas de reducción de CO2 es posible reducir el consumo hasta 78 millones de barriles por día. En cuanto al precio, se estima que su valor aumente hasta 120 USD/barril en el 2035. Según el IEO2011 [2], más del 75% del incremento en el consumo de combustible líquidos será destinado a los países Asiáticos y del Medio Oriente, gracias a su próspero crecimiento económico principalmente. Para cubrir esta demanda, la producción de combustibles líquidos deberá crecer a un ritmo de 26.6 billones de barriles por día, desde el 2008 hasta el 2035.

Como se aprecia en la Figura 2.8, el sector de la transportación y el industrial son los mayores consumidores de combustible líquido a nivel mundial, siendo el primero el más importante con un 54% del total de combustibles líquidos en el 2008, y se estima que para el 2035 incremente a 60%. La cantidad de petróleo descubierto a nivel mundial en la década pasada bordea los 14 billones de barriles en promedio [57]. Finalmente, se estima que las reservas mundiales de petróleo están entre los 1470 [5] y 1652.6 billones de barriles [58], siendo Venezuela el país con mayor crecimiento en el 2011.

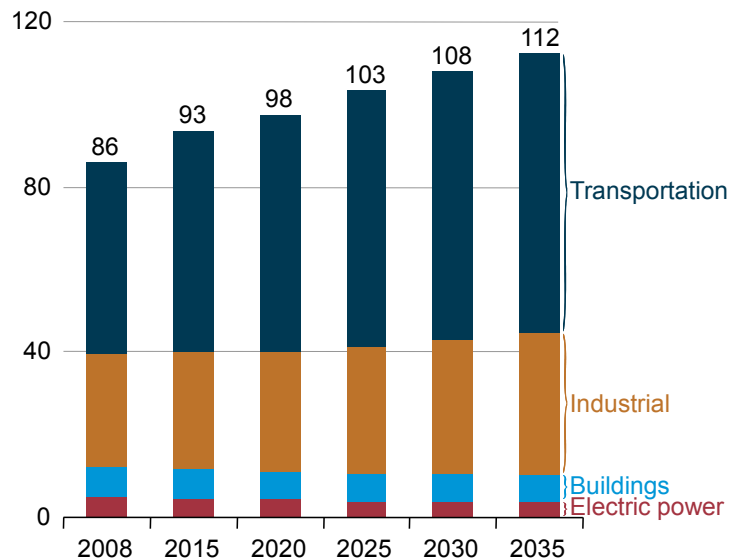


Figura 2.8: Consumo de combustible liquido por sector a nivel mundial (millones de barriles por día)[5]

2.3.4. Energía Nuclear

Esta tecnología basa su principio en el aprovechamiento de la energía liberada por división de átomos en isótopos de uranio y plutonio. Ésta se desarrolló en 1940 en la Segunda Guerra Mundial, donde se usó con fines militares en la construcción de bombas de destrucción masiva, sin embargo luego se buscaron formas de aplicarla para la generación de energía

eléctrica. La primera planta de energía nuclear inicio su operación en el año 1950 [59].

Con datos de Agosto 2012, a nivel mundial 435 reactores para la generación de electricidad están operando y 66 nuevas plantas están bajo construcción en 14 países. En el 2010 las plantas nucleares proveyeron el 13.5% de la energía eléctrica mundial. En total 13 países son capaces de generar al menos la cuarta parte de su producción total, siendo Francia el país que más porcentaje de energía eléctrica produce con esta tecnología [59].

2.3.5. Energía Eólica

El sol calienta las masas de aire en la superficie de la tierra de manera irregular, provocando diferencias de temperaturas que generan a su vez movimientos de grandes masas de aire. Este flujo ha sido aprovechado desde épocas milenarias como fuente de energía mecánica rotacional en molinos y actualmente es una de las mayores fuentes de generación eléctrica renovable después de las hidroeléctricas. Utilizando principios aerodinámicos los molinos de viento, capturan la energía cinética del viento para mover sus aspas generando movimiento mecánico rotacional que luego es transformado en energía eléctrica en el interior de las turbinas. Comercialmente existen varios modelos de ellas, pero las más comunes son las de tres aspas con eje horizontal equipados de una caja de engranes para multiplicar la velocidad del rotor del generador y alcanzar una frecuencia de generación cercana a los 50/60 Hz.

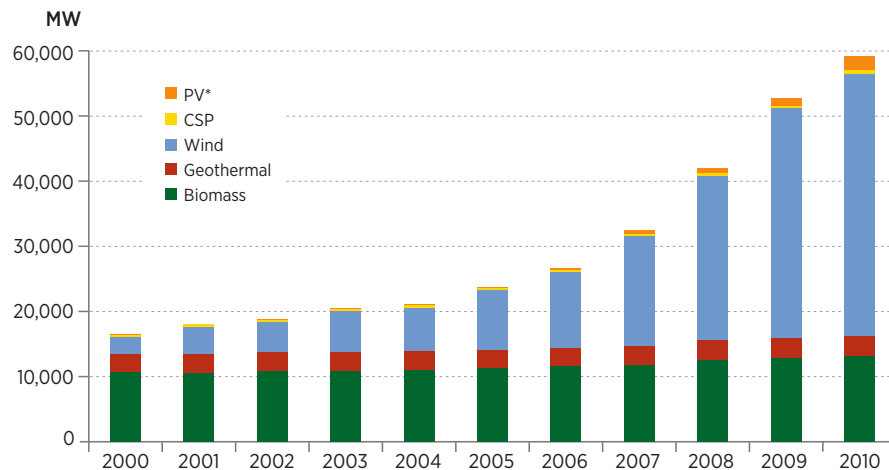


Figura 2.9: Capacidad de Generación Eléctrica Renovable de Estados Unidos [6].

Los tamaños típicos de estas turbinas van desde los 200KW hasta los 750KW, con determinados rangos de velocidad de viento para su generación en cada caso. El rápido desarrollo de esta tecnología ha permitido reducir los costos de instalación, de \$2.2/W en 1980 a \$1/W en la actualidad, del mismo modo los costos de energía se han visto reducidos de \$0.40/KWh a menos de \$0.04-\$0.06/KWh en áreas con buenas condiciones de viento [60]. A nivel mundial en el año 2000, más de 3900MW adicionales de energía eólica fueron instalados, con ventas

mayores a \$ 3.9 billones y una tasa de crecimiento del 35% anual, tendencia que ha ido en claro incremento exponencial hasta la fecha en los Estados Unidos, como se aprecia en la Figura 2.9.

2.3.6. Energía Solar

La energía solar es sin duda, una de las formas de energía renovable más abundante sobre el planeta y es la causante de provocar muchas otras, como la eólica debido al calentamiento de las masas de aire y a la tidal, debido al calentamiento de masas de agua en los océanos. Se estima que la energía proveniente del sol es de alrededor de 150.000 Terawatts, de los cuales la mitad alcanzan a ingresar a la superficie de la tierra y la otra mitad es reflejada por la atmósfera.

Paneles Solares

Los paneles solares o fotovoltaicos, son los dispositivos que convierten la energía solar en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en que la luz solar esta compuesta por pequeñas partículas de energía llamadas fotones, los mismos que son absorbidos por los paneles solares. Los fotones excitan a los electrones que se encuentran en las celdas fotovoltaicas haciendo que estos empiecen a moverse y formen pequeños flujos de corriente.

Las celdas se colocan en arreglos para formar paneles solares de diferentes tamaños y por ende potencia eléctrica que luego es utilizada como una forma de energía. Estos paneles utilizan material semiconductor tales como el silicio para convertir la energía solar en energía eléctrica, los cuales no tienen partes móviles, no generan ruido, ni contaminación de ninguna clase, tienen un tiempo de vida útil de aproximadamente 20 años y requieren poco mantenimiento. Los costos relacionados a estos elementos han disminuido de \$50/W en los inicios de 1980 a \$5/W hoy en día; del mismo modo el costo de la energía ha disminuido de \$0.90/KWh en 1980 a \$0.20/KWh en la actualidad. A pesar de su aún alto costo, en algunos países esta tecnología es ampliamente usada para alimentar de energía a lugares remotos, equipos de telecomunicaciones, vehículos, entre otros [60].

Energía Termo-Solar

Una nueva forma de producir energía derivada de la solar son los parques de generación termo-solar, que consisten en amplios campos dotados de paneles de alta reflectividad los cuales proyectan la energía capturada a una torre en la cual calientan un núcleo de sales fundidas a temperaturas del orden de los 900 °C y por medio de sistemas de transferencia de calor generan vapor el cual a su vez es usado para generación de energía eléctrica.

2.4. Formas y Dispositivos de Almacenamiento

La energía eléctrica puede ser convertida y almacenada usando diferentes principios de conservación de la energía como por ejemplo, la potencial gravitacional, el aire comprimido, la

electroquímica, la química, la cinética, la magnética, la de campo eléctrico, entre otras, para cubrir la intermitencia de las fuentes de generación actuales [61]. A continuación se describen las formas más comunes de almacenamiento, así como los dispositivos desarrollados para esta tarea.

2.4.1. Baterías

Es una de las tecnologías más usadas y disponibles en el mercado [62]. Su principio de funcionamiento se basa en dos electrodos metálicos sumergidos en un líquido, sólido o pasta llamada electrolito y conectado a una serie de placas dispuestas en serie, paralelo o ambas, de manera que se pueda obtener un nivel de voltaje adecuado. La energía eléctrica se almacena en forma de energía química, gracias a la transformación interna de éste material, es por esto, que su tiempo de vida está limitado a la capacidad de recombinación del mismo [63]. Las baterías tienen una eficiencia de entre el 60 % y el 80 %. Su ventaja son sus tiempos de respuesta muy rápidos y su desventaja el costo, el mantenimiento periódico y el tiempo de vida limitado [64].

Para poner en perspectiva, un carro puede moverse entre 30 y 45 Km con gasolina, mientras que con baterías se necesitarían entre 5 y 7 KWh, considerando que la densidad de energía es de 100 Wh/Kg en promedio, esto tendría un peso de 60 Kg en baterías vs los 3 Kg de un galón de gasolina [64].

Baterías de Plomo

Es uno de los tipos más comunes de baterías usadas para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos debido a su relación tiempo de vida útil vs. costo final. Su constitución es muy parecida a las baterías de los vehículos, las cuales requieren entregar gran cantidad de corriente en intervalos cortos de tiempo, a diferencia de los sistemas renovables, donde se necesita obtener suficiente energía por períodos más largos y con descargas más a fondo, para lo cual físicamente las capas internas deben ser más gruesas que en el caso anterior, volviéndolas más grandes, pesadas y consecuentemente dañinas para el medio ambiente. La eficiencia de Coulumb o también llamada eficiencia de Faraday, muestra que para este tipo de baterías su valor está entre 70 % y 80 % [63, 64, 65]. Dentro de este tipo, existen otras que se mencionan a continuación.

- Baterías Líquidas.- pueden ser de tapa abierta y de libre mantenimiento. Las primeras permiten la sustitución del ácido, sus ventajas son su bajo costo y sus desventajas son el peligro de derrame del ácido. En las segundas, su tiempo de vida está limitado a unos 400 ciclos de carga y descarga aproximadamente.
- Baterías VRLA.- o Valve Regulated Lead Acid, su principal característica es que recombinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua cuando éstas se descargan.

Baterías de GEL.- son selladas y el ácido está en forma de gel. Su principal ventaja es que no hay riesgo de fugas y pueden funcionar en cualquier posición, la corrosión es

reducida y son más resistentes a bajas temperaturas. La desventaja, su costo un poco más elevado y su resistencia interna más alta que limita el flujo de corriente.

Baterías de Litio-Ion

Esta tecnología posee la mayor densidad de energía que todos los tipos de baterías, entre 75 y 125 Wh/Kg. Son actualmente usados en dispositivos móviles, y actualmente se encuentran realizando mejoras para aplicaciones en transporte y otras áreas. Su principal ventaja radica en el rápido nivel de carga y descarga. Su rendimiento alcanza el 78 % con 3500 ciclos de trabajo, sin embargo, su alto costo ha sido una limitante para aplicaciones a gran escala [62].

Baterías de Ni-Cd

Níquel y Cadmio son los componentes de esta batería, y son ampliamente usadas en aplicaciones de alto consumo de potencia, tales como herramientas eléctricas y para la aviación, gracias a sus buenas características de vida (más de 3500 ciclos), sin embargo, poco a poco están siendo reemplazadas por las baterías de Li-Ion, debido a su alta toxicidad con el Cadmio y su costo es casi 10 veces más que las de plomo ácido [63, 66, 62].

Baterías de NiMH

La tecnología que usa este tipo de baterías es el Níquel Metal Hidrido y son usadas en aplicaciones de vehículos eléctricos y aplicaciones de telecomunicaciones. Estas baterías podrían sustituir a las de Ni-Cd, ya que son más amigables con el medio ambiente y además porque pueden ofrecer entre un 25 % y 40 % más energía [66].

Baterías Líquidas

Otra alternativa reciente son las baterías líquidas, las cuales tienen tiempos de respuesta muy rápidos del orden de los milisegundos, su operación es similar a las baterías convencionales basándose en reacciones electroquímicas para generar electricidad. Los químicos activos se almacenan en tanques externos y son bombeados a un reactor donde se realiza la reacción química y la consecuente generación o absorción de electricidad. Tres tipos comerciales de esta tecnología están disponibles en el mercado, las Vanadio Redox Batteries o VRBs, Zinc Bromuro ZBB y Polisulfuro Bromuro PSB. Sus ventajas son su capacidad de escalamiento ya que depende del tamaño de sus reservorios, su largo tiempo de almacenamiento, sus profundas descargas sin causar ningún daño a la misma y su bajo mantenimiento [62].

Baterías de NaS

Sus componentes son Sodio y Azufre, se consideran como una tecnología reciente y prometedora para aplicaciones de alta potencia. Una característica de esta batería es su trabajo a altas temperaturas (350°C), donde sus componentes están en estado líquido y permiten una alta reactividad en sus electrodos.

El rendimiento que poseen estas baterías son del 85 % y su densidad de energía esta en el orden de los 151 KWh/m^3 . Sus principales ventajas son que no se auto-descargan, requieren muy bajo mantenimiento y son 99 % reciclables [62]. En aplicaciones de gran escala, estas baterías fueron desarrolladas por primera vez en Japón en 1990. Luego, en 2006 en EEUU, se desarrolló un banco de baterías de 1 MW con esta tecnología. Para el 2010 se disponía un total de 365 MW de potencia instalada, siendo Japón el país con el banco más grande 34 MW [67]. Estos sistemas están instalados junto a fuentes renovables para balancear la demanda y suplir la energía en las horas pico, así como para proveer de auto recuperación al sistema en caso de fallos.

2.4.2. SuperCapacitores

En los supercondensadores la energía eléctrica se almacena en forma de campo eléctrico formado entre dos capas paralelas, de ahí que su capacidad de almacenamiento es directamente proporcional al área de las mismas e inversamente proporcional a la distancia que las separa. En teoría tienen la capacidad de cargarse y descargarse indefinidamente sin provocar daños en su estructura[63, 64]. En la industria de las turbinas eólicas, los supercondensadores son ampliamente usados para proveer de energía en caso que las turbinas disminuyan su capacidad por el movimiento de cabeceo de sus aspas. Del mismo modo, junto a paneles solares, se instala esta tecnología con el objetivo de entregar energía cuando las condiciones climáticas cambian repentinamente, ofreciendo una curva de generación un poco más suave [67]. La ventaja de estos dispositivos es la gran cantidad de energía que pueden entregar en periodos cortos de tiempo, a diferencia de las baterías que su duración de carga es más prolongado. Los supercapacitores normalmente se les usa junto a las baterías para absorber los impulsos de energía tanto de carga como de descarga que podrían afectar la vida útil de las mismas [63, 64]. Sus desventajas son: el costo que es de 5 veces más que las baterías de ácido-plomo, su baja densidad de energía y el uso de electrónica de potencia en sus instalaciones.

2.4.3. Bombeo de Agua

Es la forma más antigua para almacenar energía y actualmente la más económica [68]. Usa dos reservorios o depósitos, que pueden ser naturales o artificiales, a diferente altura; durante el día, turbinas movidas por la fuerza del agua generan electricidad para cubrir la demanda pico, mientras que por las noche, éstas bombean el agua hacia los reservorios superiores, cuando los costos de la energía son más bajos, permitiendo almacenar grandes cantidades de líquido para su posterior generación hidroeléctrica [67, 63, 62]. La eficiencia de este sistema está entre el 70 % y 85 %, dependiendo del tamaño de los reservorios, bombas y generadores. A nivel mundial alrededor de 300 instalaciones usan este sistema, con capacidades que van desde 20 MW a 2100 MW . Su principal desventaja es el costo inicial que se calcula está por \$1000 / KW [64]. En EEUU actualmente alrededor de 25 GW de capacidad opera bajo este sistema, que representa apenas el 2.5 % de su capacidad total, por ejemplo la presa Ludington junto al Lago Michigan en EEUU.

2.4.4. Vehículos Eléctricos

Poco a poco esta forma de almacenamiento va tomando forma y con el transcurso de los años se irán añadiendo al sistema más vehículos los cuales están provistos con baterías de Plomo o Ion Litio. El sector automotriz ha entrado en una etapa de hibridación de sus modelos, con la finalidad de recuperar la energía producida por la inercia de los mismos. El sector de la transportación masiva es otro claro ejemplo, donde la energía se puede recuperar por sus ciclos de paradas. La disponibilidad de almacenamiento permite aprovechar esta tecnología para hacer más eficiente la generación eléctrica en horas de mayor consumo [63].

2.4.5. Superconductores Magnéticos

Esta prometedora forma de almacenamiento se basa en el almacenamiento de energía en forma de campo magnético en un núcleo o bobina hecha de un material superconductor, el cual es alimentado con corriente continua. Durante la descarga, dicha bobina es enfriada a temperaturas que están en el rango de las decenas de °K donde el material superconductor tiene resistencia nula, esto le permite entregar grandes cantidades de corriente sin pérdidas eléctricas por resistencia.

La eficiencia de este sistema es del alrededor del 95 %, sin embargo una de las principales desventajas es su baja temperatura y la consecuente refrigeración necesaria. Por otro lado, sus ventajas son la rápida transferencia de energía, el ilimitado número de ciclos de trabajo y la alta eficiencia. Las desventajas son, su alto costo, baja densidad de energía, y las pérdidas por refrigeración en las etapas de AC-DC-AC. Sus principales aplicaciones están en la regulación de carga y la estabilidad de transitorios [62, 64].

2.4.6. Hidrógeno

Esta tecnología es considerada una de las de mayor crecimiento. El hidrógeno puede ser obtenido de varias formas, a través de la electrólisis del agua, desde fuentes renovables de energía como solar o eólica, gasificación de biomasa, por medio de carbón o combustible, siendo ésta última la más común. Cuando se obtiene de fuentes renovables se le almacena para su posterior transformación en energía eléctrica por medio de celdas de combustible. Cuando el hidrógeno es almacenado la tecnología usada son las celdas de combustible regenerativas o RFC por sus siglas en inglés.

Este sistema se compone básicamente por un dispositivo electrolizador, celdas de combustible, tanques de almacenamiento y convertidores de potencia. El hidrógeno se puede almacenar en forma de líquido a bajas temperaturas alrededor -453°F. Otra forma es estado gaseoso en tanques a presión o bajo tierra, o en formas híbridas. La eficiencia de este sistema se ubica entre el 60 % y el 85 %. Sus ventajas son la nula emisión de CO₂, el bajo costo de almacenamiento, altas densidades de energía, fácil de implementar para diferentes tamaños desde KW a MW. Sus desventajas radican en su alta inflamabilidad, su alto costo de implementación y su bajo nivel de rendimiento, que en conjunto esta alrededor del 42 % [62, 64].

A continuación se describen dos de los componentes principales de este sistema de almacenamiento.

Electrolizador

Los electrolizadores son una parte clave del sistema de almacenamiento de energía en hidrógeno, su tarea es la de transformar la energía eléctrica en hidrógeno por medio de la electrólisis del agua. Hay muchos tipos de electrolizadores desde los más comunes, como los alcalinos, hasta los más modernos, como los de membrana de electrolito polimérico o PEM (en inglés). Estos dispositivos se clasifican por el tipo de electrolito que usen, que pueden ser líquidos o sólidos, estos últimos permiten generar hidrógeno a presiones entre los 200 y 6000 PSI para almacenarlo directamente en tanques. Una de las mayores desventajas de estos dispositivos sus bajos niveles de rendimiento que se ubican alrededor del 60 % [62].

Pilas de Combustible

Al igual que los electrolizadores, el complemento a este sistema son las pilas de combustible o FC, que también se diferencian por el material del electrolito, en este caso pueden ser PEMFC, alcalinas AFC, carbonato fundido MCFC y óxido sólido SOFC. Las de tecnología PEMFC son las más usadas y su temperatura de operación esta entre los 50°C y 100 °C, además entre sus materiales esta el platino lo que la hacen muy costosa. Entre sus ventajas esta la nula emisión de ruido o contaminantes, ya que su residuo es el agua, permite almacenar energía por periodos muy largos de tiempo sin riesgo de pérdidas en Standby. Su desventaja es el rendimiento que en el mejor de los casos puede alcanzar el 70 %.

2.4.7. Flywheel

A diferencia del almacenamiento de energía potencial, este tipo de energía almacena energía cinética, es decir mientras más rápido gire su núcleo más energía almacena. Su principio se basa en una rueda circular o un cilindro que gira a muy alta velocidad, donde la energía almacenada es proporcional a la masa y al cuadrado de la velocidad de dicho elemento. La eficiencia esta entre el 80 % y el 85 % [64]. Entre sus ventajas esta su largo ciclo de vida, su alta densidad de potencia y su rapidez de carga, mientras que su desventaja radica principalmente en su baja densidad de energía y en las pérdidas por standby, que son considerablemente altas. Esta tecnología ha sido usada en aplicaciones de reducción de picos y aumento de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia [64, 65].

2.4.8. Gas Comprimido

Esta forma de almacenamiento masivo de energía se caracteriza por guardar grandes cantidades de aire o gas natural durante las horas pico (donde el costo de la energía es más barato), en depósitos naturales o artificialmente creados para el efecto. Este sistema es una planta de poder con turbinas de gas que opera en horas pico y que consume menos del 40 % del gas usado en una turbina de gas de ciclo combinado y menos del 60 % que una turbina de gas

de ciclo sencillo para producir la misma cantidad de energía. Este sistema genera electricidad durante los períodos de consumo pico a un precio inferior que una turbina de gas.

Casos exitosos de esta tecnología se tienen desde hace algunos años en Alemania y Estados Unidos con potencias que van desde 290MW en el primer caso hasta 110MW en el segundo [63, 67]. Una desventaja consiste en encontrar lugares geográficamente hábiles para almacenar el gas [68], además que para comprimir este gas se usan compresores que queman combustibles fósiles. Los tamaños van entre 20 y 300 MW con una eficiencia de 73 % al 79 % [64]

Capítulo 3

Control de Modelo Predictivo

3.1. Introducción

El Control de Modelo Predictivo o MPC, por sus siglas en inglés, integra disciplinas como el control óptimo, control estocástico, control de procesos con retardo de tiempo, control multivariable, control con restricciones, el mismo que fue desarrollado en los años 60' [69]. Es una de las metodologías de control que ha tenido un impacto significativo en la ingeniería de control industrial [70], siendo ampliamente usado en la industria petroquímica, sin embargo en la actualidad, su aplicación se está diversificando a otras áreas.

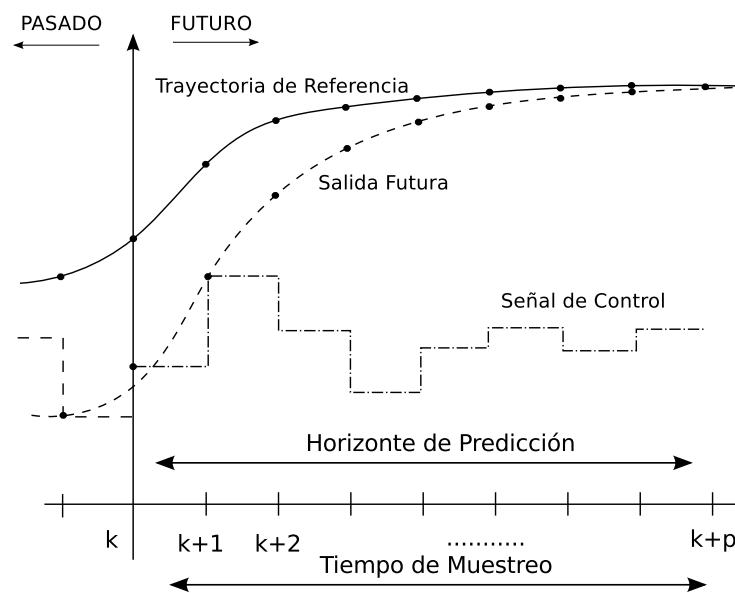


Figura 3.1: Trayectorias de control y salida de un MPC

El MPC se puede definir como una estrategia de control que se basa en un modelo matemático interno del proceso a controlar, más conocido como modelo de predicción, el mismo que se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar durante un intervalo de tiempo especificado por el operador; de este modo, se puede calcular las variables de control o manipulación futuras u para lograr que en dicho horizonte, converjan a sus respectivos valores

de referencia y . Esta optimización se lleva a cabo dentro de un horizonte de predicción, con información del modelo cargada al inicio de la misma y que se ejecuta en cada período de muestreo k [71], como se ilustra en la Figura 3.1.

La señal de control a ser aplicada al proceso es obtenida resolviendo un problema de control óptimo de un criterio, función de costo o función objetivo en lazo abierto dentro de un horizonte de control finito en línea y en cada período de muestreo k , que la mayoría de las veces se traduce en una minimización de dicha función sujeto a restricciones dadas por las características operativas del sistema, o por sus limitaciones físicas de sus componentes [70, 71]. Por lo tanto, el estado actual del sistema es usado como el estado inicial para el modelo, esto produce una secuencia de señales de control óptimas en cada período de muestreo, de las cuales solo una de ellas es aplicada al proceso y el horizonte de predicción se desplaza al siguiente instante de tiempo antes de iniciar la optimización nuevamente [69], como se ilustra en la Figura 3.2.

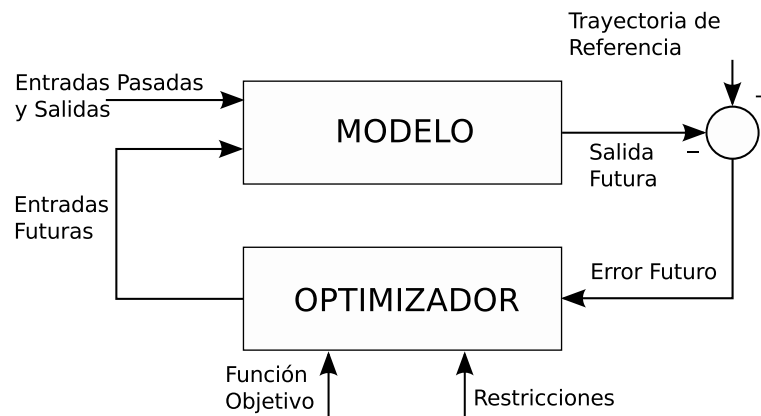


Figura 3.2: Estructura básica de un MPC

3.2. Características del MPC

Entre las características más sobresalientes del MPC está la capacidad de ser formulado de manera abierta, permitiendo la incorporación de distintos tipos de modelos de predicción, ya sean estos lineales o no lineales, monovariantes o multivariantes, y la consideración de restricciones sobre las señales del sistema. Esto hace que sea una estrategia muy utilizada en diversas áreas del control. El MPC es una de las pocas técnicas que permiten controlar sistemas con restricciones incorporando éstas en el propio diseño del controlador.

Estas características han hecho del MPC una de las escasas estrategias de control avanzado con un impacto importante en problemas de ámbito industrial, por tal motivo es importante resaltar que este tipo de control se ha desarrollado en el mundo de la industria, y ha sido la

comunidad investigadora la que se ha esforzado en dar un soporte teórico a los resultados prácticos obtenidos. Además, este control es una técnica muy potente que permite formular controladores para sistemas complejos y con restricciones, tanto en las variables de control como en las variables de estado del sistema.

A pesar de la flexibilidad y variantes que puede darse en un Control de Modelo Predictivo, los elementos que lo conforman terminan siendo los mismos, por ejemplo:

- *Modelo de predicción del proceso.*- el cual se encarga de predecir el comportamiento del sistema basado en la dinámica del proceso.
- *Función objetivo o de costo.*- expresión matemática que penaliza las acciones de control futuras con respecto a la trayectoria de referencia.
- *Restricciones del Sistema.*- las cuales representan las limitaciones físicas y operativas de las variables del proceso.

3.3. Ventajas y Desventajas del MPC

Las principales ventajas que presenta esta técnica se pueden resumir a continuación:

- Es una estrategia de control que maneja de manera natural sistemas multivariables.
- Puede manejar restricciones en los actuadores y en las variables de estados.
- Permite incluir predicciones externas de las entradas de manera natural, en nuestra aplicación ingresan los perfiles de generación solar y eólica conocidas con anticipación.
- Permite predecir la trayectoria futura de manipulación u optimizando el comportamiento de la salida de la planta y , en base a un modelo matemático de la misma.
- Permite trabajar con perturbaciones del sistema con sus respectivas predicciones. En nuestra aplicación la demanda del sistema es considerada con una predicción en su comportamiento.

Es importante considerar además que esta estrategia de control puede ser usada como un método de soporte para el operador, ya que en muchos casos se desea solamente conocer cual sería las acciones de control óptimas para tal o cual sistema y que normalmente se realiza gracias al conocimiento histórico o experiencia y no se necesita una acción de retroalimentación al proceso. No obstante, esta estrategia también posee desventajas, una de las cuales se deriva directamente de su modelo y radica en el costo computacional que representa calcular las señales de manipulación cuando el sistema incrementa el número de variables y el horizonte de predicción de las mismas, a pesar de que en la actualidad la capacidad de procesamiento de los computadores va en incremento. Otra desventaja que presenta el MPC, es que este algoritmo se basa en el conocimiento previo del sistema y su rendimiento va de la mano con la calidad de la representación matemática de la planta.

3.4. Modelo en Espacio de Estados

Los sistemas de Control de Modelo Predictivo son diseñados en base a un modelo matemático de la planta y para este caso se pueden usar varios métodos como se mencionan en [71]. Los métodos de identificación de procesos como la respuesta al impulso, respuesta escalón, así como también funciones de transferencia son muy usados, sin embargo es de gran importancia seleccionar un modelo que permita y facilite describir la conducta de la dinámica del proceso de manera adecuada. Como se mencionó anteriormente una de las características fundamentales del MPC es la facilidad para trabajar con sistemas multivariábles y una de las formas de representación que se ajusta a estas condiciones es el modelo en espacio de estados, lineal e invariante en el tiempo.

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \\ y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Donde,

$$\begin{aligned}x(k) \in \mathbb{R}^n & \text{ son las variables de estado} \\ u(k) \in \mathbb{R}^m & \text{ son las variables de manipulación} \\ d(k) \in \mathbb{R}^p & \text{ son las variables de perturbaciones}\end{aligned}$$

3.5. Restricciones

Generalmente existen tres grandes tipos de restricciones encontradas en las aplicaciones, las dos primeras tienen que ver con restricciones de control $u(k)$ y el tercer tipo se relaciona con la salida $y(k)$ o lo que es lo mismo con las variables de estado $x(k)$. Estas restricciones en los procesos están asociadas directa o indirectamente con costos de energía. Los actuadores y variables de estado, poseen limitaciones físicas inherentes a sus características naturales las cuales pueden ser, valores máximos y mínimos de corriente, voltaje, flujo, capacidades de depósitos, etc. como en nuestro caso la capacidad de almacenamiento de energía de baterías y tanques de hidrógeno [70]. Por otro lado, esta característica permite que los sistemas puedan operar en condiciones mucho más cercanas a estos límites mejorando el rendimiento total del sistema.

3.5.1. Restricciones de Control

Un sistema de control predictivo tiene la característica que permite introducir restricciones tanto a las señales de control como a las variables de la salida, de manera que los cambios de estas se den dentro de un determinado límite. Si se considera que el horizonte de predicción $H_p = 1$, y que se tiene una señal de control, quedaría expresado de esta forma:

$$u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k)$$

Al descomponer esta desigualdad en función de $u(k)$, se tiene:

$$\begin{cases} u_{min}(k) - u(k) \leq 0 \\ u(k) - u_{max}(k) \leq 0 \end{cases} \implies \underbrace{\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}}_{F_0} u(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} u_{min} \\ -u_{max} \end{bmatrix}}_{f_0} \leq 0$$

Donde F_0 es la matriz formada por dos submatrices identidad de signo alternado cuyo tamaño viene dado por el número de señales de manipulación m_i , mientras que f_0 es el vector formado por los límites mínimo y máximo que definen las restricciones sobre las variables de manipulación y que se ordenan de manera alternada, como se muestra a continuación:

$$F_0 = \begin{bmatrix} -I_{m_i} \\ I_{m_i} \end{bmatrix}, \quad f_0 = \begin{bmatrix} u_{min} \\ -u_{max} \end{bmatrix}$$

Finalmente, si el sistema se generaliza para un número H_p de instantes de muestreo y m_i señales de manipulación, puede ser expresado de la siguiente manera:

$$FU + f \leq 0$$

Donde,

$$F = \underbrace{\begin{bmatrix} -I_{m_i} & 0 & \cdots & 0 \\ I_{m_i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -I_{m_i} & \cdots & 0 \\ 0 & I_{m_i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -I_{m_i} \\ 0 & 0 & \cdots & I_{m_i} \end{bmatrix}}_{2 \cdot H_p \cdot m_i \times H_p \cdot m_i}, \quad f = \underbrace{\begin{bmatrix} u_{min} \\ -u_{max} \\ u_{min} \\ -u_{max} \\ \vdots \\ u_{min} \\ -u_{max} \end{bmatrix}}_{2 \cdot H_p \cdot m_i \times 1}$$

3.5.2. Manipulación Diferencial

Además de las restricciones asociadas a las manipulaciones, que en este caso corresponden al valor de su amplitud, es importante considerar la variación de las acciones de control entre cada intervalo de muestreo, aspecto que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema, evitando cambios bruscos de referencia a los controladores inferiores. El cambio de la manipulación entre el valor futuro y el valor actual viene dado por la siguiente expresión.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \tag{3.2}$$

Si esta ecuación la expresamos en un horizonte de control H_u y para m_i señales de manipulación se tiene:

$$\mathcal{U} = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+H_u-1) \end{bmatrix}; \quad \Delta \mathcal{U} = \begin{bmatrix} u(k) - u(k-1) \\ u(k+1) - u(k) \\ u(k+2) - u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+H_u-1) - u(k+H_u-2) \end{bmatrix};$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} I_{m_i} & 0 & \cdots & 0 \\ I_{m_i} & I_{m_i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m_i} & I_{m_i} & \cdots & I_{m_i} \end{bmatrix}; \quad \Pi = \begin{bmatrix} I_{m_i} \\ I_{m_i} \\ \vdots \\ I_{m_i} \end{bmatrix}$$

Finalmente expresando esto en notación matricial se tiene:

$$\mathcal{U} = \Theta \cdot \Delta \mathcal{U} + \Pi \cdot u(k-1) \quad (3.3)$$

3.5.3. Restricciones de Estado

$$x_{min}(k) \leq x(k) \leq x_{max}(k)$$

Procediendo de la misma manera que para el caso de las restricciones de control, se puede llegar a la siguiente expresión:

$$GX + p \leq 0$$

Donde,

$$G = \underbrace{\begin{bmatrix} -I_{m_i} & 0 & \cdots & 0 \\ I_{m_i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -I_{m_i} & \cdots & 0 \\ 0 & I_{m_i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -I_{m_i} \\ 0 & 0 & \cdots & I_{m_i} \end{bmatrix}}_{2 \cdot H_p \cdot m_i \times H_p \cdot m_i}, \quad p = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{min} \\ -x_{max} \\ x_{min} \\ -x_{max} \\ \vdots \\ x_{min} \\ -x_{max} \end{bmatrix}}_{2 \cdot H_p \cdot m_i \times 1}$$

3.6. Función Objetivo

Esta expresión matemática conocida también como función de costo, penaliza las desviaciones en las acciones de control futuras con respecto a la trayectoria de referencia o ante cualquier otro punto definido convenientemente. Esta función de costo es del tipo lineal

cuadrática multiobjetivo, debido a que las restricciones, como se vera más adelante, están definidas en forma de desigualdades y de cierto modo se ajustan a este tipo de optimización usando programación cuadrática ampliamente explicada en la literatura [71]. Por lo tanto el objetivo final del control de modelo predictivo se centra en resolver un problema de optimización cuadrática sujeta a restricciones de desigualdad dadas por las variables de manipulación, variables de estado y por condiciones de operación del sistema en general.

El principal objetivo de un sistema híbrido de energía renovable es aprovechar al máximo la energía proveniente de fuentes de generación renovable y satisfacer la demanda solicitada por las cargas, optimizando al mismo tiempo el almacenamiento o provisión de energía en exceso o déficit que este presente durante cada instante de tiempo. Por lo tanto el MPC es una estrategia de control que resuelve un problema de optimización cuadrática multivariable con un sistema de restricciones dinámicas, destinadas a predecir las acciones de control óptimas de acuerdo a la función de costo definida por el usuario.

En nuestro trabajo, la función de costo a minimizar es la siguiente:

$$\min_{\Delta u, \varepsilon} \left[\sum_{i=0}^{H_u-1} f_1(k+i) + \sum_{i=0}^{H_p} f_2(k+i) + \sum_{i=0}^{H_u-1} f_3(k+i) \right] \quad (3.4)$$

Donde,

- H_p es el horizonte de predicción
- H_u es el horizonte de control
- k representa el instante de tiempo actual
- i representa el instante de tiempo futuro

Además, $f_1(k) = \|\alpha u(k)\Delta t\|_{W_e}$, minimiza el costo económico de la red, tomando en cuenta los costos de producción (α) en el bus DC, los mismos que se toman de manera ponderada para cada una de las acciones de control; $f_2(k) = \|\varepsilon(k)\|_{W_x}^2$, es el índice de rendimiento de estado de carga de los dispositivos de almacenamiento, el cual penaliza el porcentaje de carga del banco de baterías o hidrógeno que desciende del nivel de seguridad definido; $f_3(k) = \|\Delta u(k)\|_{W_u}^2$, minimiza las variaciones en las señales de control que van hacia los convertidores de energía, evitando variaciones bruscas de los valores de referencia y por ende los transitorios. Finalmente, W_e , W_x , W_u , son matrices diagonales de ponderación que se incluyen para dar mayor prioridad de minimización.

3.7. Formulación del Control de Modelo Predictivo

Un sistema dinámico expresado en espacio de estados tiene la siguiente estructura para el primer tiempo de muestreo:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \quad (3.5)$$

El mismo que puede ser consecutivamente expresado para cada instante de muestreo hasta un numero entero de veces H_p , que en este caso se denomina horizonte de predicción. En el Anexo A, se detalla dicho procedimiento obteniendo finalmente una representación matricial de la siguiente forma:

$$X = \sigma + \Lambda \mathcal{U} + \Upsilon \mathcal{D} \quad (3.6)$$

Donde,

$$X = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \\ x(k+3) \\ \vdots \\ x(k+H_u) \\ \vdots \\ x(k+H_p) \end{bmatrix} \quad \sigma = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} x(k),$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB & B & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{H_u-1}B & A^{H_u-2}B & \cdots & \cdots & B \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{H_p-1}B & A^{H_p-2}B & \cdots & \cdots & \sum_i^{H_p-H_u} A^i B \end{bmatrix}, \quad \mathcal{U} = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+H_u-1) \end{bmatrix},$$

$$\Upsilon = \begin{bmatrix} B_p & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB_p & B_p & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{H_u-1}B_p & A^{H_u-2}B_p & B_p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{H_p-1}B_p & A^{H_p-2}B_p & A^{H_p-3}B_p & \cdots & B_p \end{bmatrix}, \quad \mathcal{D} = \begin{bmatrix} d(k) \\ d(k+1) \\ \vdots \\ d(k+H_u-1) \\ \vdots \\ d(k+H_p-1) \end{bmatrix};$$

Capítulo 4

Modelado del Sistema Híbrido

En esta sección se presenta la descripción matemática de un sistema híbrido de energía renovable, su modelado, la metodología y la estrategia de control para el diseño del MPC. La metodología se inspira en trabajos relacionados a redes de suministro de agua potable urbano, de la cual se extraen y adaptan determinados conceptos. El control de modelo predictivo básicamente utiliza información explícita dentro del modelo matemático del sistema para predecir el comportamiento futuro de la planta, por lo cual es necesario e importante definir un modelo que este acorde al comportamiento del mismo.

4.1. Sistema Fotovoltaico

Sin lugar a dudas la fuente de energía más abundante y de más fácil acceso sobre el planeta es la solar, de cuya energía total que incide sobre la tierra apenas una pequeña fracción sería suficiente para abastecer la demanda mundial. De esta energía se aprovechan los paneles fotovoltaicos que la transforman en energía eléctrica, sin causar ningún tipo de contaminación ambiental; además, no tienen partes móviles ni mecánicas que se puedan deteriorar por lo cual requieren muy bajo mantenimiento. En los últimos años esta tecnología ha tenido un franco desarrollo en la generación de electricidad en grandes cantidades, lo que ha permitido disminuir sus costos de fabricación e incrementar sus niveles de eficiencia.

Los modelos matemáticos de los paneles solares describen las características eléctricas de salida en función de la irradiación solar, la temperatura de las celdas y voltaje de carga. Las celdas solares consisten básicamente de una juntura $p-n$ montado sobre una fina capa de semiconductor el cual al ser expuesto a la luz solar genera pequeños flujos de electrones que son proporcionales a la irradiación incidente, cuyo comportamiento presenta una característica no lineal de corriente vs. voltaje y potencia vs. voltaje.

Una descripción matemática que relaciona corriente y voltaje se define en [72], que se basa en la corriente fotovoltaica, un diodo, una resistencia en paralelo que representa la corriente de fuga y una resistencia en serie que describe la resistencia interna al flujo de corriente propia del material semiconductor, como se aprecia en la Figura 4.1 y cuya Ecuación 4.1 la describe.

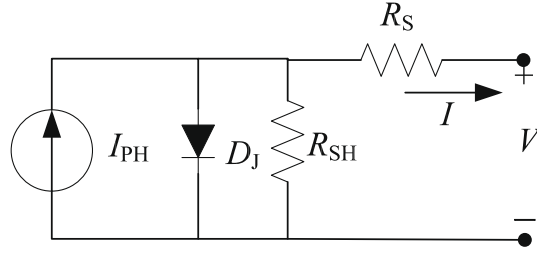


Figura 4.1: Modelo General de un Panel Solar

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \frac{q(V + IR_S)}{kT_c A} - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_S}{R_{SH}} \right) \quad (4.1)$$

Donde,

- I_{PH} corriente fotovoltaica
- I_s corriente de saturación
- q es la carga del electrón ($1,6 * 10^{-19} C$)
- k es la constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23} J/K$)
- T_c es la temperatura de operación
- A es un factor ideal
- R_{SH} es la resistencia en paralelo
- R_S es la resistencia en serie

La corriente fotovoltaica depende básicamente de la irradiación solar y la temperatura de operación, como lo describe la Ecuación 4.2

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I (T_C - T_{Ref})] \lambda \quad (4.2)$$

Donde,

- I_{SC} corriente de cortocircuito de la celda a $25^\circ C$
- K_I coeficiente de temperatura de corto circuito de la celda

Mientras tanto, la corriente de saturación de la celda fotovoltaica varia con la temperatura de operación, y se describe por la Ecuación 4.3. El factor ideal A depende del tipo de tecnología usada para la construcción del panel y se resume en la Tabla 4.1.

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{Ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{kA} \right] \quad (4.3)$$

Donde,

I_{RS} corriente de saturación inversa
 E_G es la energía de band-gap

Tabla 4.1: Factor A y tipo de tecnología

Tecnología	A
<i>Si – mono</i>	1.2
<i>Si – poly</i>	1.35
<i>a – Si : H</i>	1.8
<i>a – Si : Htandem</i>	3.3
<i>a – Si : Htriple</i>	5
<i>CdTe</i>	1.5
<i>CIS</i>	1.5
<i>AsGa</i>	1.3

Algunas variantes de este primer modelo se han desarrollado con el objetivo de simplificar y al mismo tiempo generalizar el comportamiento de estos dispositivos, dando lugar a una representación que tiene una fuente de corriente fotovoltaica, dos diodos en paralelo, una resistencia en serie, con la variante de que la resistencia en paralelo se considera infinita eliminando así la corriente de fuga inversa, como se muestra en la Figura 4.2 y se expresa en la Ecuación 4.4

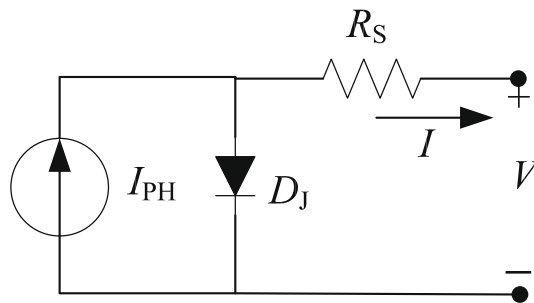


Figura 4.2: Modelo Alternativo de un Panel Solar

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{kT_c A} \right) - 1 \right) \quad (4.4)$$

En cambio un modelo ideal toma en consideración que la resistencia en serie y en paralelo no existen, eliminando de esta manera todo tipo de pérdidas asociadas a las mismas, con lo cual se obtiene una representación como muestra la Figura 4.3 y que se expresa con la Ecuación 4.5.

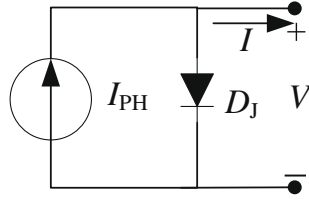


Figura 4.3: Modelo Ideal de un Panel Solar

$$I = I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{qV}{kT_c A}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

Sin embargo, el voltaje y corriente que es capaz de generar una celda fotovoltaica es del orden de las unidades de vatios y décimas de voltios, razón por la cual es necesario acomodar las celdas en arreglos tanto en serie como en paralelo con el objetivo de obtener el voltaje y corriente necesarios. La Figura 4.4 muestra un arreglo de celdas fotovoltaicas para formar un panel con N_p celdas en paralelo y N_s celdas en serie, cuya expresión característica es la Ecuación 4.6.

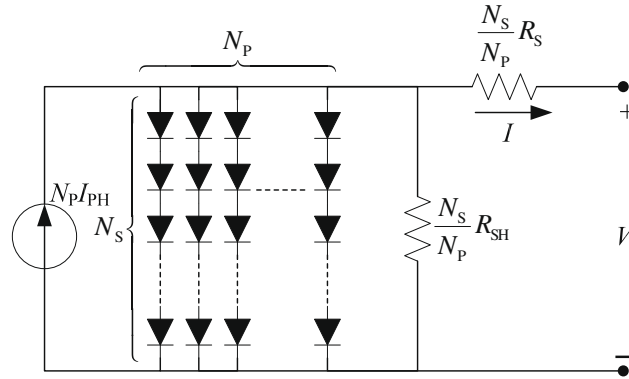


Figura 4.4: Modelo Generalizado de un Panel Solar

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_S}{N_p} \right)}{k T_c A} \right) - 1 \right] - \left(\frac{\frac{N_p V}{N_s} + I R_S}{R_{SH}} \right) \quad (4.6)$$

Comercialmente los paneles solares se conectan en serie para generar el voltaje de trabajo necesario y en paralelo para alcanzar la potencia nominal; además la resistencia en paralelo no altera la operación del conjunto, mientras que la de serie afecta significativamente el desempeño de todo el panel, por lo que la primera puede ser despreciada, dando lugar a un circuito equivalente como muestra la Figura 4.5 y cuya expresión matemática esta definida por la Ecuación 4.7.

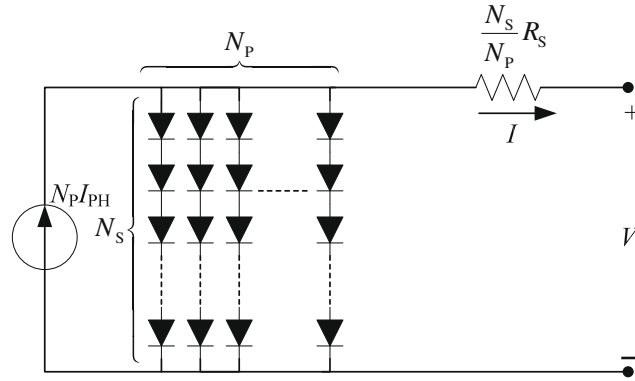


Figura 4.5: Modelo Alternativo Generalizado de un Panel Solar

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right)}{k T_c A} \right) - 1 \right] \quad (4.7)$$

Del mismo modo se puede definir un modelo ideal para un arreglo de celdas, cuyo esquema eléctrico simplificado se muestra en la Figura 4.6 y cuya relación voltaje corriente que la representa, se expresa en la Ecuación 4.8.

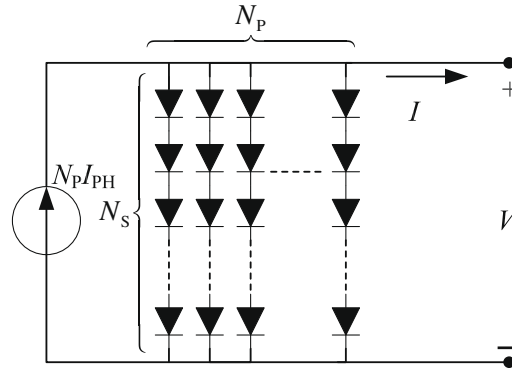


Figura 4.6: Modelo Ideal Generalizado de un Panel Solar

$$I = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{k T_c A} \right) - 1 \right] \quad (4.8)$$

La radiación solar depende de la ubicación geográfica en el planeta. En nuestro caso la ubicación geográfica seleccionada para realizar el estudio en esta tesis corresponde a Texas en Estados Unidos, un estado el cual se caracteriza por ser uno de los mayores productores de energía solar y eólica en este país. Específicamente en la ciudad de Austin, se encuentra instalado el parque solar de Webberville con una potencia instalada de 35MW, cuyas coord-

Tabla 4.2: Irradiación Solar Promedio Mensual (KWh/m²/día)

30°15' N 97° 31' O	Radiación Solar (KWh/m ² /día)			Índice de Claridad (0 a 1)		
	Promedio	Δ mín(%)	Δ máx(%)	Promedio	Mínimo	Máximo
Enero	2.89	-22	21	0.49	0.38	0.59
Febrero	3.44	-24	26	0.47	0.36	0.60
Marzo	4.45	-25	24	0.50	0.37	0.62
Abril	5.37	-19	25	0.52	0.42	0.65
Mayo	5.65	-17	13	0.50	0.42	0.57
Junio	6.39	-13	13	0.55	0.48	0.63
Julio	6.59	-15	9	0.58	0.49	0.63
Agosto	5.97	-11	10	0.56	0.50	0.62
Septiembre	5.04	-14	14	0.54	0.46	0.62
Octubre	4.08	-26	18	0.53	0.39	0.62
Noviembre	3.15	-28	24	0.50	0.36	0.63
Diciembre	2.68	-24	19	0.49	0.37	0.58
Promedio Anual	4.64	-19.83	18	0.52	0.42	0.61

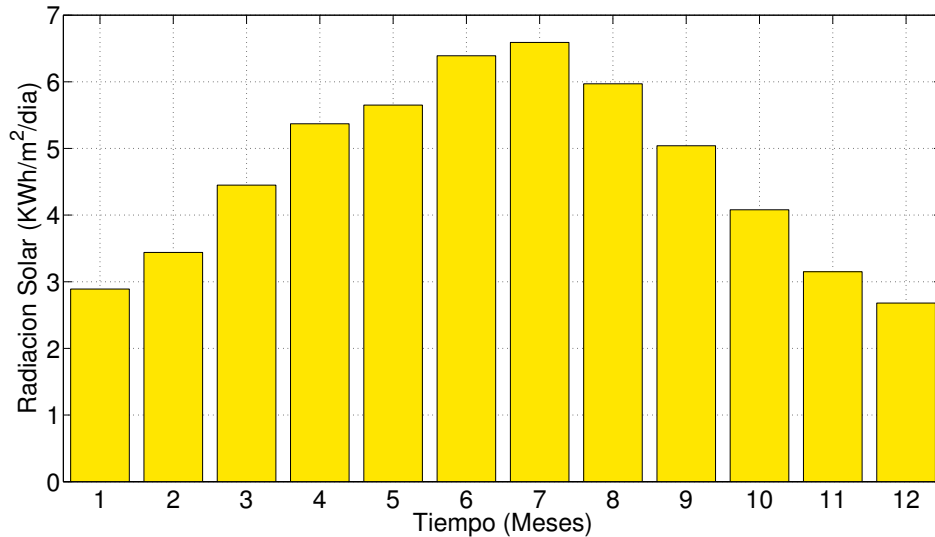


Figura 4.7: Irradiación Promedio Mensual

nadas geográficas son: 30°15'N, 97°31'O. La potencialidad que dispone esta ubicación para la generación de energía eléctrica solar es uno de las más grandes en Estados Unidos, con una

taza de irradiación solar que bordea los 4.64 (KWh/m²/día) en promedio, como se aprecia en la Tabla 4.2, datos que pueden ser obtenidos en [73], cuyos valores han sido recolectado a lo largo de veintidós años de medición .

En la Figura 4.7 se aprecia la cantidad de energía irradiante del sol promediada mensualmente durante un año, donde se nota claramente que los meses con mayor índice de irradiación son los de verano para esta parte del planeta, lo que implica una mayor cantidad de generación eléctrica.

4.2. Turbina Eólica

Una de las fuentes de energía renovable que más crecimiento ha tenido en los últimos años ha sido la eólica, siendo Alemania, España, Estados Unidos, Dinamarca y la India los países que mayor número de turbinas eólicas instaladas poseen, acumulando una generación que bordea el 80 % del total de energía eólica mundial. Las grandes cantidades de energía que se pueden obtener en el poco espacio que ocupan y su relativo bajo costo comparado con otras tecnologías, hacen de esta tecnología un atractivo para el desarrollo y crecimiento a nivel mundial.

Las turbinas de pequeña escala son las que generan electricidad a costos elevados, a diferencia de las de mediano y gran tamaño que generan electricidad más económica. Actualmente la altura de las turbinas eólicas esta en el orden de los 50m, 70m y 100m, debido a que las corrientes de viento durante las horas del día se ven afectadas por el calentamiento de las masas de aire cerca a la superficie terrestre, provocando que las mismas asciendan y sean reemplazadas por masas de aire frío provenientes desde más arriba, razón por la cual los vientos cercanos a la superficie durante las horas del medio día son más fuertes que en las noches. Sin embargo, este comportamiento esta sujeto a varios factores, entre ellos las condiciones climáticas reinantes en la zona y la ubicación geográfica en las cuales fueron instaladas [74, 75].

La potencia disponible en una turbina de viento generalmente vienen expresadas en curvas de potencia *vs* velocidad que cada turbina puede manejar y soportar, como la mostrada en la Figura 4.8, que corresponde a una turbina de 10 KW pico de potencia. La mayoría de las turbinas eólicas de gran tamaño disponen de sistemas de control de velocidad y protecciones en caso de existir excesos en la velocidad, evitando de esta forma daños físicos y eléctricos en los equipos.

La cantidad de energía del viento que se transfiere al rotor de una turbina de viento es directamente proporcional a la densidad de aire, el área del rotor y al cubo de la la velocidad del viento, como se aprecia en la Ecuación 4.9.

$$P = \frac{\rho\pi R^2 V^3}{2} \quad (4.9)$$

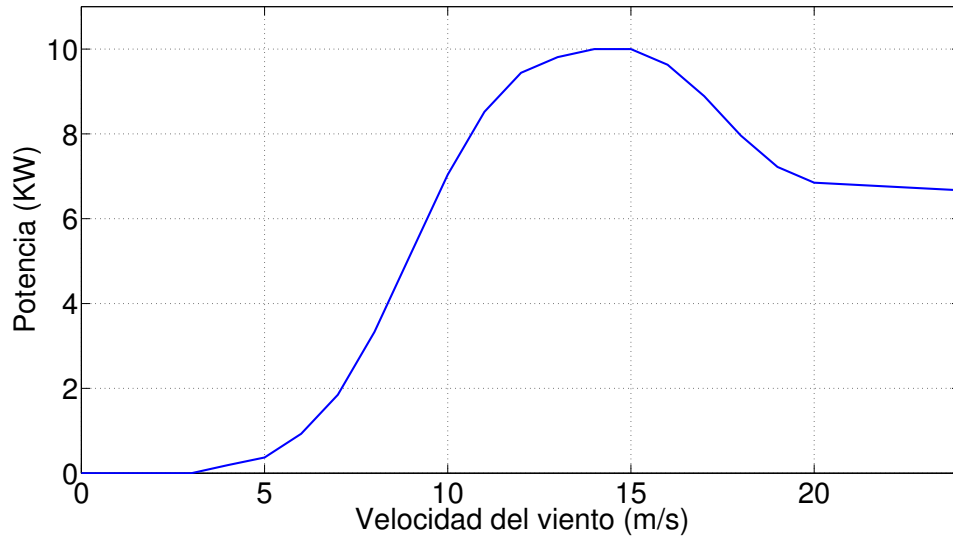


Figura 4.8: Curva de Potencia de un Aerogenerador de 10KW

Donde,

- P es la potencia en el viento en W
- ρ es la densidad del aire en (Kg/m^3) . A presión atmosférica y $15^\circ C$ el aire pesa alrededor de $1.225 Kg/m^3$
- V es la velocidad del viento en (m/s)
- R es la longitud de cada aspa medida desde el centro de la turbina

Por otro lado, la velocidad del viento varía de acuerdo a la altura y a la rugosidad de la superficie sobre la cual han sido instaladas las turbinas eólicas, dando lugar a vientos favorables en terrenos lisos como el mar o llanuras, mientras que en terrenos con presencia de árboles o edificios la turbulencia es mayor y no facilita la circulación del aire [76]. El aumento de velocidad del viento en función de la altura, en terrenos no demasiado complejos, puede evaluarse mediante la siguiente expresión:

$$V(h) = V_o \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (4.10)$$

Donde,

- $V(h)$ es la velocidad del viento estimada a una altura h del suelo
- V_o es la velocidad del viento conocida a una altura de referencia h_0
- h es la altura de viento estimada
- h_0 es la altura de referencia conocida
- α valor que depende de la rugosidad del lugar de instalación

Nuevamente Texas aparece como el estado con mayor cantidad de energía eólica generada, y con mayores condiciones climáticas favorables para su desarrollo. Actualmente se encuentra

Tabla 4.3: Estimación del valor α para distintos terrenos

Tipo de terreno	α
Liso (mar, arena, nieve)	0.1 - 0.13
Rugosidad Moderada (hierba, cultivos)	0.13 - 0.20
Rugoso (bosques, edificaciones)	0.20 - 0.27
Muy Rugoso (ciudades)	0.27 - 0.40

instalado el parque de generación eólica más grande del mundo en Roscoe, con una potencia instalada de 731,5MW sobre una superficie agrícola de más de 400 Km², con vientos que promedian los 4.62 (m/s) como se aprecia en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Velocidad Promedio Mensual del Viento (m/s)

30°15' N 97° 31' O	Velocidad de Viento (m/s)		
	Promedio	Δ mín(%)	Δ máx(%)
Enero	5.08	-10	9
Febrero	5.27	-8	16
Marzo	5.44	-7	10
Abril	4.97	-13	23
Mayo	4.49	-19	17
Junio	4.24	-21	28
Julio	4.01	-25	17
Agosto	3.76	-15	11
Septiembre	4.13	-15	13
Octubre	4.45	-10	11
Noviembre	4.97	-7	12
Diciembre	4.72	-8	8
Promedio Anual	4.62	-13	15

En la Figura 4.9 se aprecia la velocidad de viento disponible promediada mensualmente durante un año, donde se puede notar una complementariedad con la irradiación solar, es decir en los meses en los cuales la energía solar es máxima, la energía eólica es mínima y viceversa, sin embargo también se puede ver que a diferencia de la energía solar, la velocidad de viento se mantiene más regular durante el año, además de que durante las horas que no

hay sol aún se puede obtener pequeñas cantidades de energía, brindándole así cierta ventaja sobre los paneles solares.

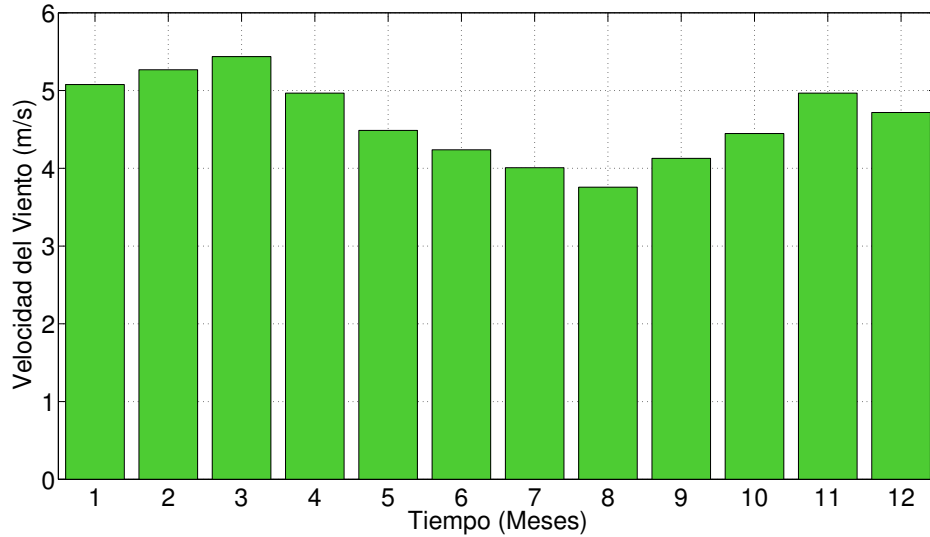


Figura 4.9: Velocidad del Viento Promedio Mensual (m/s)

4.3. Conversores de Energía

De manera sencilla un conversor puede ser entendido como aquel equipo o dispositivo que transforma energía de un estado a su entrada a otro de la misma o diferente naturaleza en su salida, como se ilustra en la Figura 4.10. El factor de acoplamiento entre la salida y la entrada es normalmente conocido como el factor de rendimiento del conversor (η) y normalmente es menor a uno (< 1), debido a las pérdidas en el proceso interno que en la mayoría de los casos son de tipo térmico y mecánico.

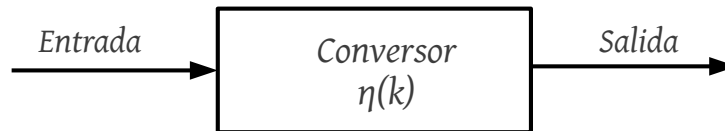


Figura 4.10: Conversor de Energía

En los sistemas híbridos, los conversores de energía son ampliamente usados para convertir la energía de los paneles y turbinas eólicas de corriente continua a corriente alterna o viceversa dependiendo del tipo de equipo utilizado, en cuyo caso la transformación es netamente eléctrica, sin embargo, la conversión se puede realizar entre fuentes de distinta naturaleza como es el caso de los Electrolizadores y Celdas de Combustible las mismas que transforman la energía eléctrica en gas hidrógeno y viceversa respectivamente.

Matemáticamente la relación entre la salida y la entrada en estado estable se puede definir por medio de la Ecuación 4.11. En cada caso los valores de rendimiento son variables entre marcas, modelos y tamaños de los equipos, incluso se puede considerar una variación en cada instante de muestreo denotando cierto grado de degradación en los equipos, sin embargo el considerarlo constante durante todo el periodo de simulación es una buena aproximación que ayuda a simplificar la estrategia de control. Estos factores de rendimiento vienen definidos de fábrica en los equipos y se les puede resumir de acuerdo a un determinado rango, como se muestra en la Tabla 4.5.

$$y_i(k) = \eta_i(k)x_i(k) \quad (4.11)$$

Tabla 4.5: Valores típicos de rendimiento en estado estable

Dispositivo	Rendimiento η
Convertor DC/DC	0.75 - 0.85
Convertor AC/DC	0.73 - 0.87
Convertor DC/AC	0.75 - 0.87
Cargador de Batería	0.78 - 0.88
Electrolizador	0.5 - 0.75
Celda de Combustible	0.4 - 0.65

El flujo de energía que circula por cada convertor representa la variable de entrada del sistema de control, y son cantidades físicas que deben ser respetadas y consideradas como restricciones en la función objetivo a ser minimizada por el algoritmo de control, cuya tarea es garantizar que el flujo de energía se mantenga dentro de los límites definidos y además se cumpla con la demanda de las cargas. En la Ecuación 4.12 se muestran las restricciones que deben cumplir las señales de control que llegan como valores de referencia a los convertidores de energía del sistema híbrido.

$$u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k) \quad (4.12)$$

4.4. Dispositivos de Almacenamiento

Por su parte los dispositivos de almacenamiento están compuestos por un convertor de energía y un elemento interno de almacenamiento, como se ilustra en la Figura 4.11. Para este caso los convertidores de energía se consideran los cargadores de baterías, los electrolizadores y las celdas de combustible, todos ellos tomando energía del bus de corriente continua del cual están siendo alimentados.

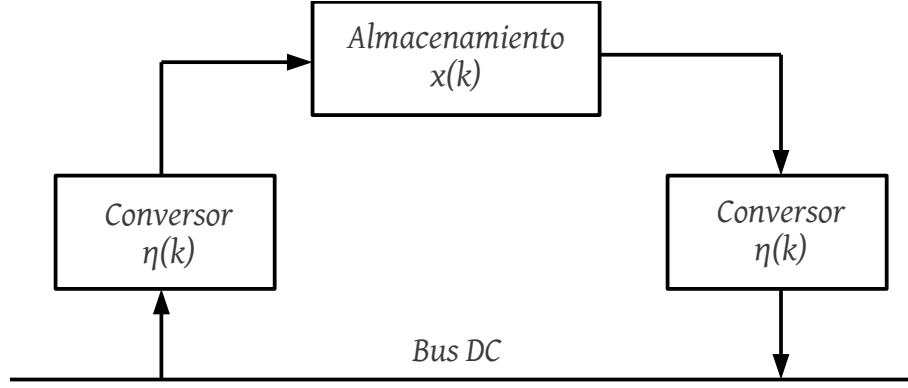


Figura 4.11: Almacenamiento de Energía

Matemáticamente la interfaz de almacenamiento es definida de manera análoga a los convertidores de energía descritos anteriormente, considerando sus entradas en estado estable y su salida relacionada por medio del factor de rendimiento de cada dispositivo, como se describe en la Ecuación 4.13.

$$y_i(k) = \eta_i(k)x_i(k) \quad (4.13)$$

$\eta_i(k)$ es el factor de eficiencia de carga y descarga, el cual describe que tanto flujo de energía ha sido recibido o entregado desde o hacia el sistema híbrido. Dicho factor depende de la dirección del flujo de energía visto desde el Bus DC, el cual puede tomar los siguientes valores:

$$\eta_i(k) = \begin{cases} \eta_i^+ & \text{Si } u_i(k) \geq 0 \quad (\text{carga/standby}) \\ 1/\eta_i^- & \text{Si } u_i(k) < 0 \quad (\text{descarga}) \end{cases} \quad (4.14)$$

Tomando un criterio desde el punto de vista discreto, el estado de carga de los dispositivos de almacenamiento al instante $x(k+1)$ dependen del estado anterior $x(k)$ y el total del flujo de energía de carga y descarga en un periodo de tiempo ΔT entre k y $k+1$, asumiendo condiciones de estado estable durante este intervalo de tiempo, análisis que se formula en la Ecuación 4.15.

$$x(k+1) = x(k) + \int_k^{k+1} u_i(t) dt = x(k) + u_i(k)\Delta T \quad (4.15)$$

De esta manera se obtiene un vector $\mathbf{x}(k+1)$ que contiene todos los estados de almacenamiento al instante $x(k+1)$, dependientes de los estados actuales $x(k)$ que están contenidos en el vector $\mathbf{x}(k)$ junto con la matriz \mathbf{B} que contiene los valores de los factores de rendimiento de carga y descarga de cada dispositivo de almacenamiento.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{i,1}(k+1) \\ x_{i,2}(k+1) \\ \vdots \\ x_{i,n}(k+1) \end{bmatrix}}_{x_i(k+1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{i,1}(k) \\ x_{i,2}(k) \\ \vdots \\ x_{i,n}(k) \end{bmatrix}}_{x_i(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_{i,1}(k) & & & \\ & \eta_{i,2}(k) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \eta_{i,n}(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_{i,1}(k) \\ u_{i,2}(k) \\ \vdots \\ u_{i,n}(k) \end{bmatrix}}_{u_i(k)} \quad (4.16)$$

Además, al tratarse de dispositivos físicos los mismos que cuentan con capacidades de almacenamiento finitas, se hace necesarios definir límites de carga y descarga, en función de las características operativas de cada elemento y sus tiempos de vida útil deseados, restricciones que son incluidas directamente en el modelo de optimización del algoritmo de control y que se definen según la Ecuación 4.17.

$$x_{min}(k) \leq x(k) \leq x_{max}(k) \quad (4.17)$$

4.5. Balance Energético

Esta expresión se puede entender como el equilibrio existente en un punto del sistema donde toda la energía generada por los diversas fuentes es igual a toda la energía consumida por las cargas, manteniendo un saldo igual a cero en el Bus de corriente continua que actúa como nodo de conexión de los diferentes elementos que forman parte del sistema, como se aprecia en la Figura 4.12.

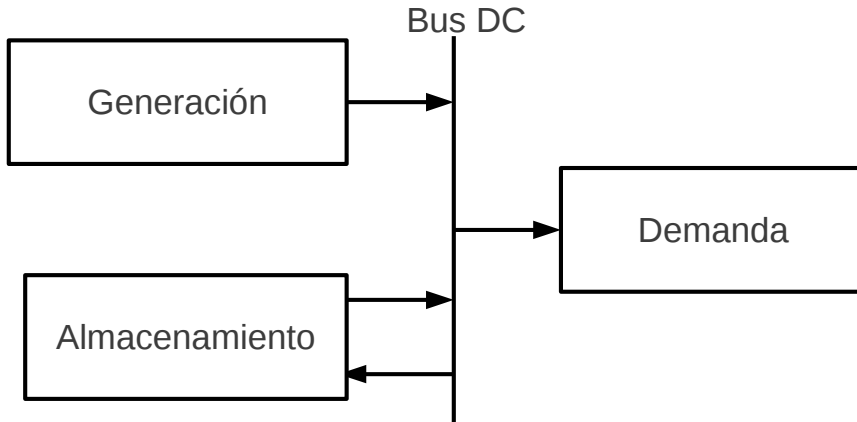


Figura 4.12: Topología Básica de Sistema Híbrido

Esta consideración es bastante ideal, debido a que el sistema puede estar sujeto a variaciones debidas a diferentes causas, entre ellas la variabilidad propia de las fuentes de generación y las intermitencias en los consumidores. Sin embargo, de manera general se puede establecer una relación matemática de este comportamiento la cual se aprecia en la Ecuación 4.18.

$$\sum_i^n P_{i,in}(k) = \sum_i^n P_{i,out}(k) \quad (4.18)$$

4.6. Demandas

Este sistema se propone para alimentar dos cargas, una de tipo residencial, cuyo perfil se muestra en la Figura 4.13, y una de tipo industrial, que se aprecia en la Figura 4.14, con potencias máximas promedio de consumo de 22.22 KW y 38.01 KW respectivamente, cuyos valores horarios se detallan en la Tabla 4.6, los mismos que debido a su naturaleza ocurren, para el caso residencial en horas de la noche y en el caso industrial en horas de la mañana. Este perfil de consumo es típicamente usado para estudios de benchmark en sistemas de distribución [77].

Tabla 4.6: Potencia Horaria Media Residencial e Industrial (KW)

Hora	Carga Residencial (KW)	Carga Industrial (KW)	Carga Total (KW)
00:00 - 01:00	5.859	12.444	18.303
01:00 - 02:00	4.868	11.379	16.247
02:00 - 03:00	4.564	11.259	15.822
03:00 - 04:00	4.604	13.253	17.857
04:00 - 05:00	5.390	16.338	21.728
05:00 - 06:00	8.143	21.847	29.990
06:00 - 07:00	12.918	29.830	42.748
07:00 - 08:00	15.655	35.134	50.789
08:00 - 09:00	16.598	38.007	54.605
09:00 - 10:00	17.024	37.800	54.824
10:00 - 11:00	16.196	33.714	49.910
11:00 - 12:00	17.236	30.845	48.081
12:00 - 13:00	17.027	30.685	47.712
13:00 - 14:00	15.493	32.334	47.827
14:00 - 15:00	13.668	32.597	46.265
15:00 - 16:00	12.359	31.363	43.722
16:00 - 17:00	13.936	25.505	39.441
17:00 - 18:00	17.982	19.870	37.852
18:00 - 19:00	21.735	17.958	39.693
19:00 - 20:00	22.218	16.633	38.851
20:00 - 21:00	19.227	15.354	34.581
21:00 - 22:00	15.819	14.124	29.943
22:00 - 23:00	12.490	13.481	25.971
23:00 - 00:00	8.592	12.345	20.937

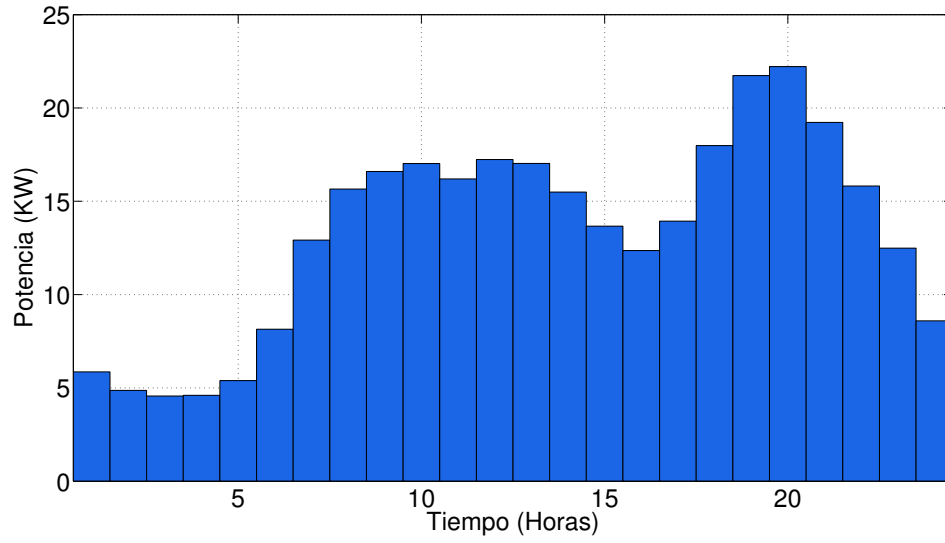


Figura 4.13: Promedio Mensual de Carga Residencial

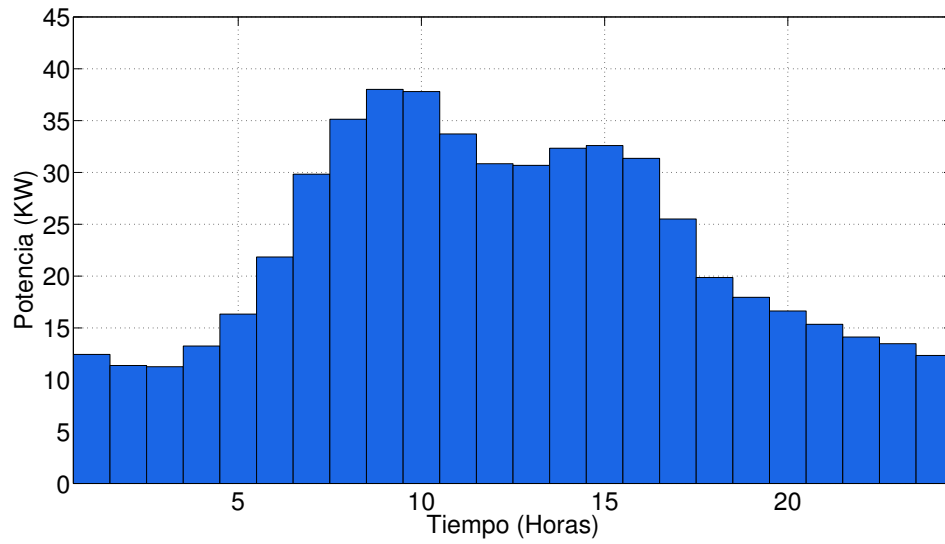


Figura 4.14: Promedio Mensual de Carga Industrial

Capítulo 5

Experimentación y Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se aborda la problemática de la estrategia de control aplicada a los sistemas híbridos de energía renovable sobre tres escenarios ilustrativos que muestran las fortalezas y debilidades del algoritmo ante circunstancias de operación comúnmente encontradas en este tipo de sistemas. El algoritmo de control es puesto en ejecución con datos anuales de generación y demanda, pudiendo evaluar su comportamiento ante condiciones normales, favorables y desfavorables de operación presentes durante este lapso de tiempo, esto significa que el conjunto híbrido estará sujeto a condiciones climáticas variables en el transcurso del año, las mismas que influyen de manera directa en la potencia de generación eólica y solar; además, el perfil de demanda también contiene datos anuales del consumo residencial e industrial, los mismos que tienen una variación horaria y diaria dada por la conducta de los consumidores en el transcurso de los años.

Este análisis empieza con una topología que se la conoce como *modo aislado*, es decir no dispone de conexión a la red pública, imposibilitando la importación o exportación en caso de déficit o exceso de energía, respectivamente. Esta topología esta compuesta por paneles solares y turbinas eólicas para la generación, y como dispositivos de almacenamiento se dispone de un banco de baterías, que en conjunto alimentan a una carga residencial.

La topología es ampliada, añadiendo un sistema de almacenamiento basado en hidrógeno, el mismo que incorpora electrolizadores y celdas de combustible, para alimentar adicionalmente a una carga de tipo industrial. Además, para conservar la característica de sistema aislado, se agrega un generador termo-eléctrico, cuya función es cubrir el déficit de generación en los momentos de mayor consumo, brindando un mayor nivel de seguridad en el suministro de energía a las cargas. Finalmente, a diferencia de la topología anterior, el generador termo-eléctrico es reemplazado por una conexión a la red pública convirtiéndose en un sistema *no aislado*, el mismo que permite importar o exportar la cantidad de energía necesaria para cubrir la demanda.

5.2. Escenario 1: Sistema Aislado

El sistema aislado es una de las topologías más sencillas que se pueden encontrar en sistemas híbridos de energía renovable. Esta topología es capaz de proporcionar un voltaje de alimentación estable a las cargas, suministrando energía directamente de las fuentes renovables cuando las mismas son capaces de cubrir la demanda y almacenando energía en las baterías en caso de existir un exceso; del mismo modo, en caso de haber un déficit, la batería proporciona energía suficiente para cubrir el consumo. Actualmente existen muchas instalaciones de esta naturaleza y se las puede usar como punto de partida para sistemas híbridos más complejos. En la Figura 5.1 se aprecia un sistema compuesto por Turbinas Eólicas, Paneles Solares, Bancos de Baterías, Demandas Residenciales y de tipo Industriales sobre un bus de corriente continua.

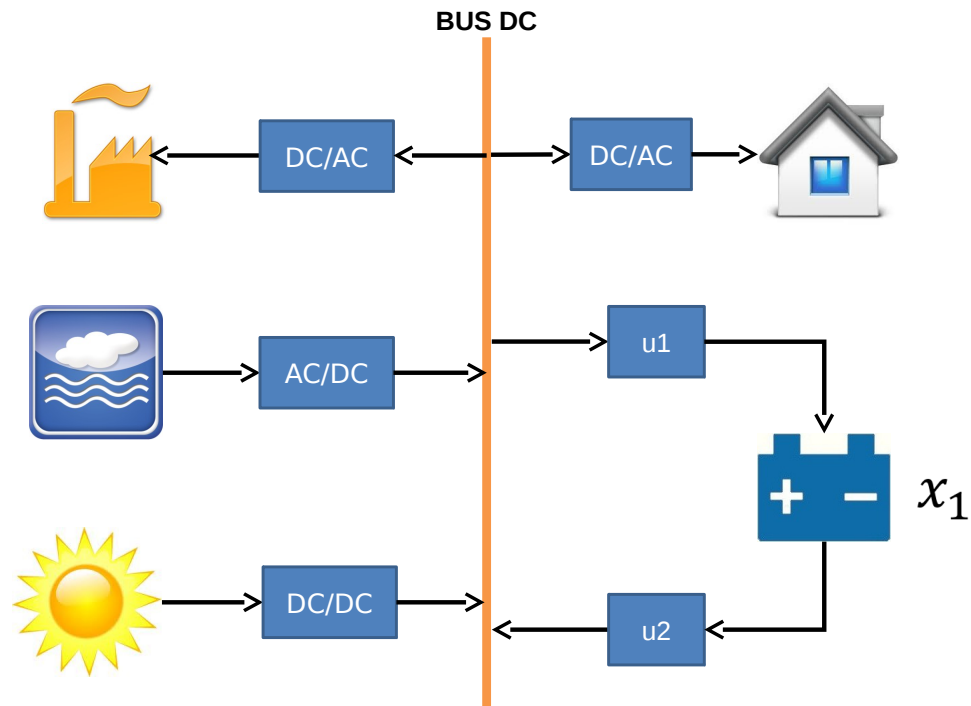


Figura 5.1: Sistema Híbrido Aislado

5.2.1. Generación

La cantidad de energía eléctrica generada por los paneles solares y las turbinas eólicas tienen un perfil que dependerá de las condiciones climáticas de la zona y que típicamente presentan un perfil de generación bastante irregular como se aprecia en la Figura 5.2 para un intervalo de tiempo de 120h. Con el objetivo de abastecer la demanda y mantener una proporción equitativa de energía renovable que permita compensar la ausencia o exceso de

las mismas durante el periodo de simulación, el producto de la optimización en términos del tamaño de fuentes de generación se resume en la Tabla 5.1, donde los paneles solares entregan 148,416 KWh/año que representa el 47% de la energía, mientras que las turbinas eólicas aportan con 164,903 KWh/año, es decir el restante 53%. El factor de carga se entiende como la relación entre la potencia media y la potencia nominal instalada, que para el caso de la energía solar es del 21.2%, entre tanto que para la energía eólica es del 18.8%, valores característicos de este tipo de tecnologías. Además,

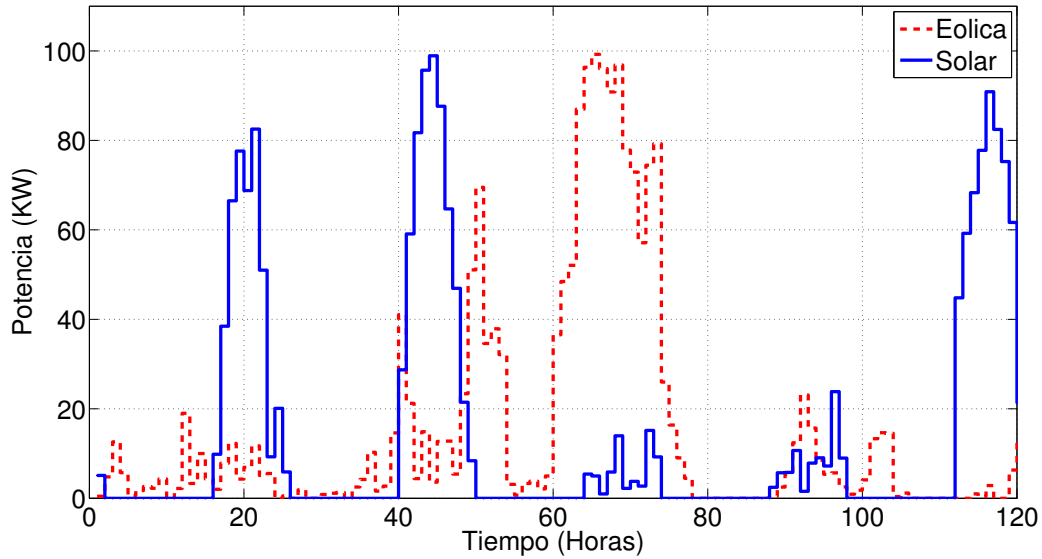


Figura 5.2: Perfil de Generación Eólica y Solar

Tabla 5.1: Potencia de Generación Eólica y Solar

Componente	Paneles Solares	Turbinas Eólicas
Potencia Instalada	80 KW	100 KW
Potencia Media	17 KW	19 KW
Factor de Carga	21.2 %	18.8 %
Producción Total	148,416 KWh/año	164,903 KWh/año
Aporte	47 %	53 %

5.2.2. Algoritmo de Control

El modelo del sistema representado en espacio de estados puede definirse por medio de la ecuación 5.1, la misma que contiene una sola variable de estado $x_1(k)$ que en este caso es el estado de carga de la batería y su estado futuro $x_1(k+1)$, dos señales de control $u_1(k)$ y $u_2(k)$ que representan la carga y descarga de la misma y cuatro señales de perturbación,

donde $d_1(k)$ y $d_2(k)$ son las fuentes de generación eólica y solar, respectivamente, mientras que $d_3(k)$ y $d_4(k)$ son la demanda industrial y residencial, respectivamente.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k)$$

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0,85 & -1,1236 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

El equilibrio de energía en el Bus DC se cumple de acuerdo a la ecuación 5.2, cuya expresión garantiza que la cantidad de energía que ingresa al bus salga del mismo. En la práctica esta condición es una de las más difíciles de cumplir debidos a varios factores, entre los cuales esta principalmente la precisión de los instrumentos de medición y su calibración, lo que podría provocar variaciones de voltaje en el bus, que serían vistas como perturbaciones por los sistemas de control locales instalados en los otros equipos los mismos que darían solución a este inconveniente. Además, esta condición de equilibrio de energía obliga al sistema a disponer del suficiente tamaño, tanto de las fuentes de generación como de los dispositivos de almacenamiento, de manera que se pueda absorber la energía en exceso y al mismo tiempo permita abastecer la demanda en caso de escasez de las fuentes de generación.

$$E_u u(k) + E_d d(k) = 0$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix} = 0 \quad (5.2)$$

Por otra parte, las restricciones bajo las cuales la función objetivo debe minimizar las variables de control para lograr un resultado óptimo vienen dadas por las condiciones físicas del sistema híbrido, en este caso por la capacidad de almacenamiento del banco de baterías en (KWh), el estado inicial de carga y su porcentaje mínimo de seguridad, los mismos que tienen gran impacto en el comportamiento del sistema y su dimensionamiento.

Normalmente las baterías usadas en sistemas de energía renovable se caracterizan por tener un rango de profundidad de descarga limitado [78], en nuestro caso ese rango esta limitado a un 60 %, es decir el mínimo valor de estado de carga deseado es del 40 %, partiendo desde un estado de carga inicial (cuando las baterías están nuevas) del 90 %. Además, el tamaño óptimo del banco de baterías, obtenido por el simulador es de 90,000 KWh, y el de su cargador y convertor 1,000 KW con un rendimiento del 85 %, los cuales permiten que el flujo de energía que ingresa o sale de la batería sea el apropiado para abastecer la demanda de energía. Estos valores se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Restricciones del Sistema

Característica	Valor
Banco de Baterías	90,000 KWh
Estado Inicial de Carga	90 %
Estado de Carga de Seguridad	40 %
Cargador de Baterías	1000 KW
Rendimiento de Carga y Descarga	0.85

5.2.3. Parámetros de Simulación

Dentro de esta característica se encuentran aquellos valores que permiten definir el comportamiento del sistema ante las condiciones previamente analizadas, de los cuales el primero en mencionar es el período de muestreo, el mismo que se considera de una hora (1h), siendo esta cifra bastante adecuada, debido a que es usado de manera generalizada para este tipo de aplicaciones, por ejemplo, para la predicción climática de irradiación solar y velocidad de viento, así como para el pronóstico del consumo de energía tanto residencial como industrial, lo que permite ir a la par en la secuencia de datos disponibles.

En segundo lugar esta el horizonte de predicción, el mismo que ha sido seleccionado en base a la repetitividad de los perfiles de generación y consumo, que para este caso es de veinticuatro horas (24h) debido al ciclo natural de actividades de la mayoría de los consumidores y por ende de su comportamiento de consumo que definen el perfil de carga residencial de manera directa, como se aprecia en la Figura 4.13, al igual que el perfil carga industrial como se muestra en la Figura 4.14.

Finalmente, las constantes de peso de la función objetivo son seleccionadas en base a varias pruebas realizadas y analizando su influencia en los resultados finales. Estas constantes forman las matrices de ponderación W_e , W_x , W_u analizadas en el Capítulo 3, las mismas que influyen de manera directa a los factores a ser minimizados y por ende a las señales de control óptimas calculadas. Todos estos parámetros son resumidos en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Parámetros del Algoritmo de Control MPC

Característica	Valor
Período de Muestreo	1 hora
Horizonte de Predicción	24 horas
Peso Económico (W_e)	20
Peso de Seguridad (W_x)	5
Peso de Suavidad (W_u)	0.1

5.2.4. Resultados

La estrategia de control utilizada en esta topología arroja varios resultados entre los cuales el primero en identificar fácilmente es el aporte de energía eólica y solar mensualmente al sistema como se muestra en la Figura 5.3, donde se aprecia que el mes de mayor generación eléctrica es el mes de marzo y el de menor el mes de agosto.

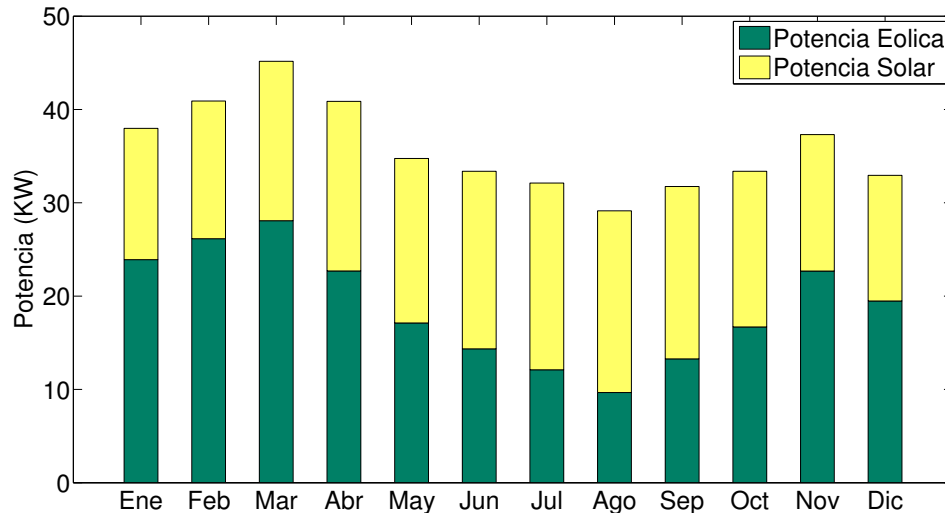


Figura 5.3: Aporte de Energía Eólica y Solar

Posteriormente se pueden destacar el tema económico, el mismo que se resume en la Tabla 5.4, en la cual se aprecia que a pesar del costo por KWh más económico que tiene el Banco de Baterías, éste representa la mayor inversión del sistema, debido a su gran tamaño en vista que debe ser capaz de almacenar toda la energía generada y al mismo tiempo alimentar a la carga en caso de escasez.

Tabla 5.4: Costo Total del Sistema

Componente	Tamaño	Costo de Instalación (USD/KW)	Total (USD)
Paneles Solares	80 KW	6,182	494,560
Turbinas Eólicas	100 KW	1,973	197,300
Banco de Baterías	90,000 KWh	400	36'000,000
Total del Sistema	-	-	36'691,860

Por otro lado basados en los costo nivelados de energía definidos en [79] y según el tamaño óptimo determinado por el algoritmo de control se tiene que su costo es considerablemente

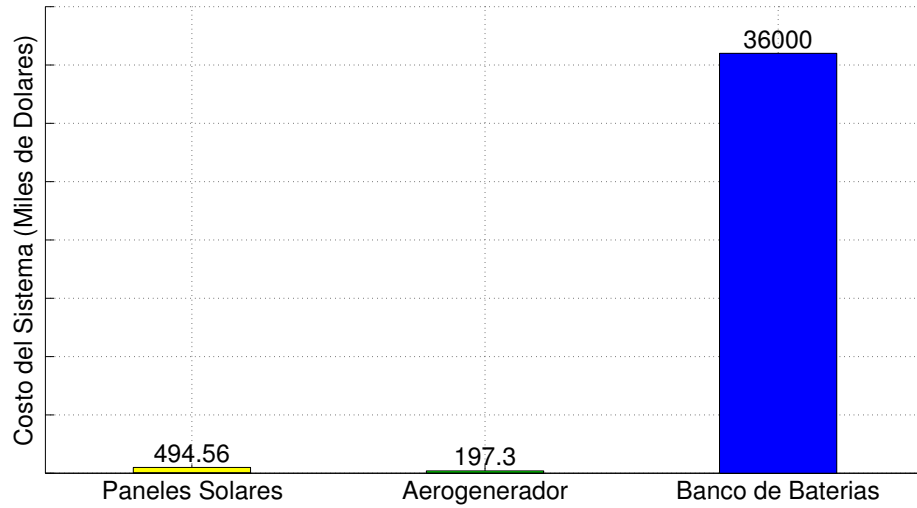


Figura 5.4: Costo por Tipo de Fuente de Generación

inferior al del Banco de Baterías, como se aprecia también en la Tabla 5.4. Mientras tanto en la Figura 5.4 se ilustra de manera gráfica la diferencia en costo entre los elementos del sistema, donde el excesivo costo de esta topología hace que difícilmente puede ser implementada para sistemas de gran envergadura y se limita a aplicaciones pequeñas donde la relación costo y tamaño del sistema es más equilibrada.

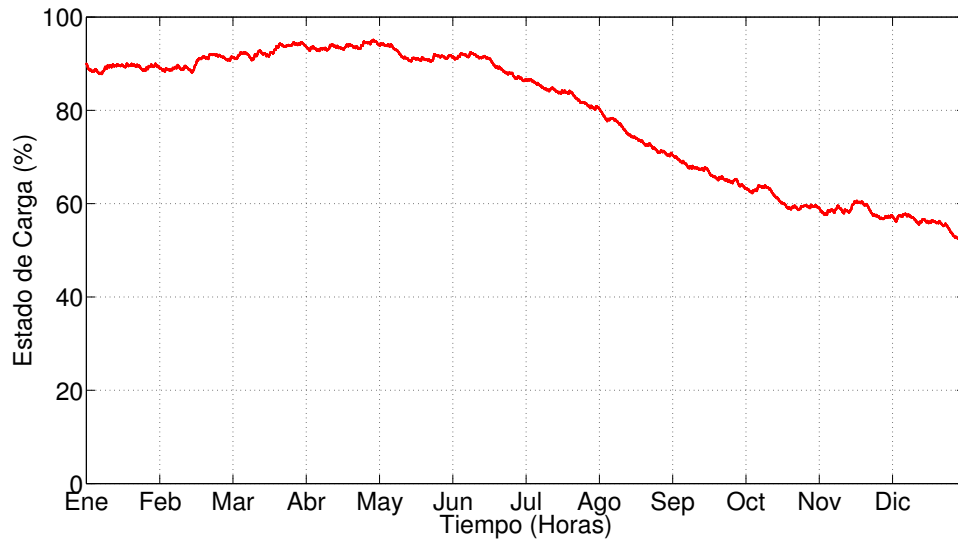


Figura 5.5: Estado Mensual de Carga de la Batería

La evolución del estado de carga del Banco de Baterías se puede apreciar en la Figura 5.5, que partiendo con un estado de carga inicial del 90% alcanza su máximo en los meses

de abril y mayo llegando a valores alrededor del 95% y posteriormente disminuye hasta aproximadamente el 50%. Sin embargo, a pesar del gran tamaño del Banco de Baterías no se puede asegurar de manera definitiva que este volumen de almacenamiento sea suficiente para los años posteriores, debido a que el nivel de carga inicial siguiente es aproximadamente un 45% inferior al actual.

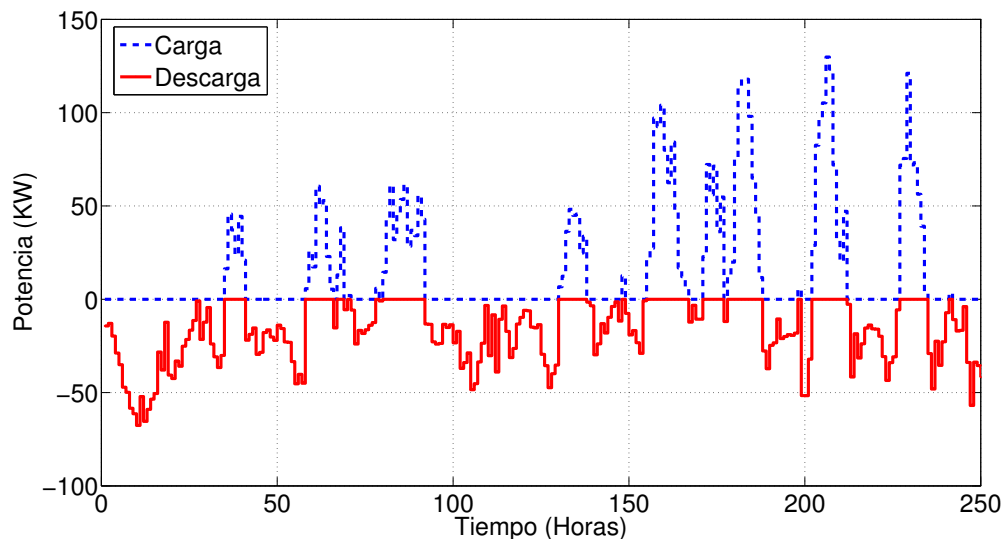


Figura 5.6: Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías

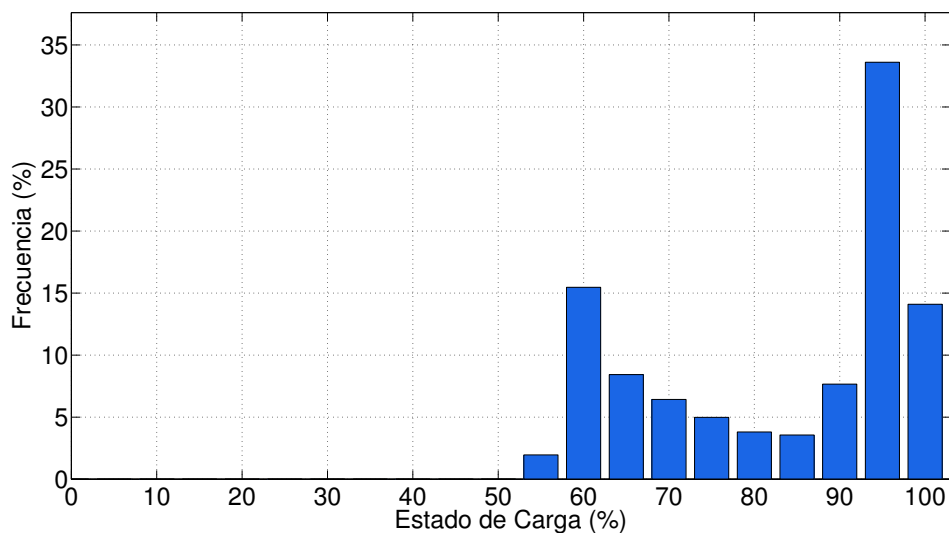


Figura 5.7: Frecuencia del Estado de Carga

Finalmente, en la Figura 5.6 se aprecian las señales de manipulación de carga y descarga del banco de baterías y en la Figura 5.7 se ilustra la frecuencia con la cual el estado de

carga del Banco de Baterías permanece durante los doce meses del año, pudiendo notar que aproximadamente un 34 % de las veces el estado de carga permanece al 95 % y un 15 % de las veces en un 60 % del estado de carga.

5.3. Escenario 2: Sistema Aislado Ampliado

El sistema aislado ampliado se caracteriza básicamente por añadir nuevas formas de generación eléctrica y dispositivos de almacenamiento a la topología estudiada en la sección anterior; en este caso, se considera una fuente de generación termo-eléctrica, la misma que proveerá del suministro de energía en los momentos más críticos de operación del sistema, sirviendo como respaldo o *backup* de las fuentes renovables solar y eólica instaladas. A pesar de no ser una fuente de generación limpia y amigable con el medio ambiente, este tipo de generadores son ampliamente usados en sistemas híbridos debido a su facilidad de instalación y su relación costo-generación que bordea los dos mil (2,000 USD) dolares por KWh.

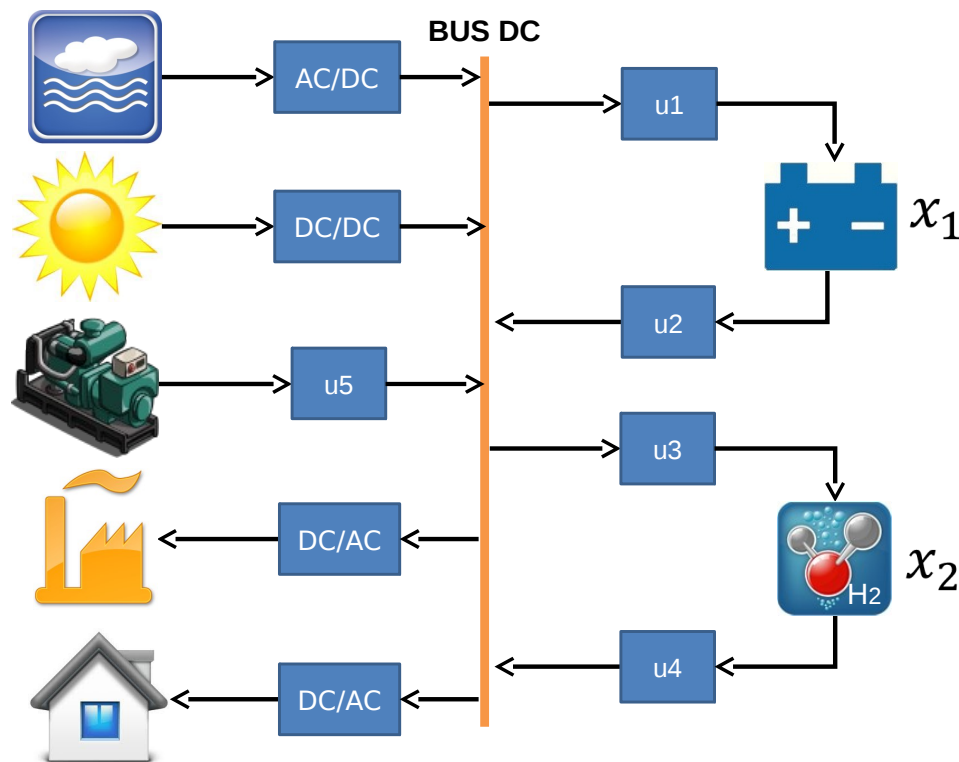


Figura 5.8: Sistema Híbrido Aislado Ampliado

En la Figura 5.8 se aprecia la topología de sistema híbrido aislado ampliado, donde se nota que el generador termo-eléctrico será comandado por las señales óptimas calculadas por el MPC, esto significa que el generador operará únicamente cuando el algoritmo considere necesario para cubrir la demanda.

Adicionalmente, una nueva forma de almacenamiento es también considerada en esta topología, la misma que consiste en un sistema compuesto por electrolizadores, pilas de combustible y tanques de hidrógeno. Este principio de almacenamiento basado en hidrógeno permite reducir el tamaño de los bancos de baterías y por ende su alto costo, (como se vió en el caso anterior), brindando al sistema la opción de generar hidrógeno en los momentos en los cuales existe exceso de energía y paralelamente cuando las baterías están próximas a llegar a su nivel máximo de carga.

5.3.1. Generación

A diferencia de la topología analizada en la sección 5.2, la energía generada proviene también de una componente termo-eléctrica, que además de servir como respaldo de energía, ayuda a disminuir el tamaño del Banco de Baterías, el componente más costosos hasta el momento en la instalación. Lamentablemente el uso de esta fuente de generación produce gases de efecto invernadero, motivo por el cual dentro de los factores de ponderación en la función objetivo, W_e , W_x , W_u , se asignan pesos específicos más altos (α) a esta fuente, permitiendo minimizar la cantidad de energía producida e indirectamente reducir la contaminación ambiental causada por la misma.

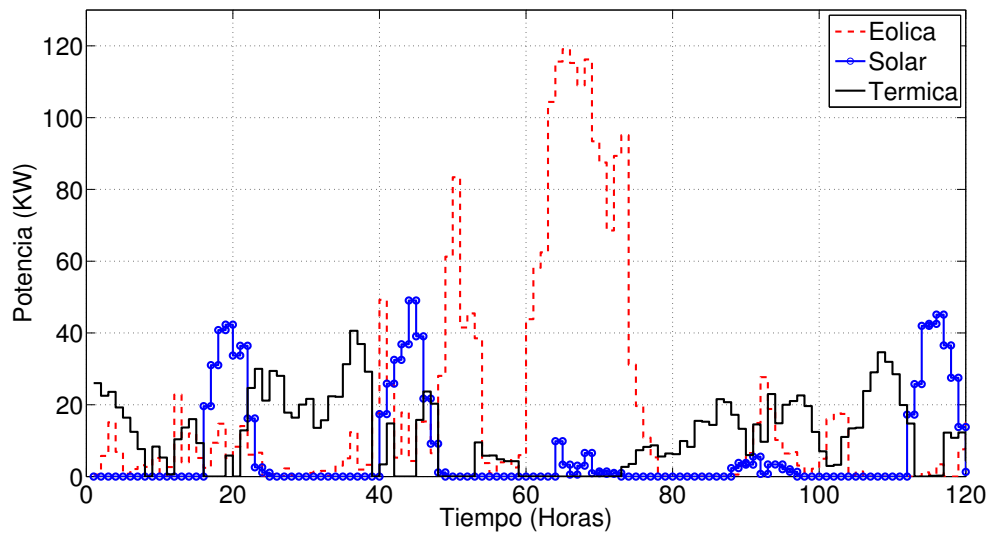


Figura 5.9: Perfil de Generación Eólica, Solar y Térmica

En la Figura 5.9 se aprecia el perfil de generación de las tres fuentes de energía que forman parte del sistema híbrido y en la Tabla 5.5 se condensa la información referente al porcentaje de aporte y capacidades netas instaladas, destacando que la energía solar tiene un aporte del 18.98 %, mientras que la eólica y térmica lo hacen con 55.09 % y 25.92 % respectivamente.

Tabla 5.5: Potencia de Generación Eólica, Solar y Térmica

Componente	Paneles Solares	Turbinas Eólicas	Generador Térmico
Potencia Instalada	40 KW	120 KW	75 KW
Potencia Media	7.78 KW	22.59 KW	10.66 KW
Factor de Carga	19.45 %	18.83 %	14.21 %
Producción Total	68,174 KWh/año	197,880 KWh/año	93,111 KWh/año
Aporte	18.98 %	55.09 %	25.92 %

5.3.2. Algoritmo de Control

El algoritmo de control de modelo predictivo juega un papel preponderante en estas circunstancias, ya que al tener información de las futuras 24 horas de comportamiento tanto de las fuentes de generación como de la demanda y en base a los rendimientos del cargador de baterías, convertidores, electrolizadores y pilas de combustible, determina los niveles óptimos de carga tanto de las baterías como del nivel de hidrógeno, garantizando en cada instante el suministro de energía a la carga y el aprovechamiento máximo de la energía generada.

El modelo del sistema representado en espacio de estados puede definirse por medio de la ecuación 5.3, donde se identifican dos variables de estado $x_1(k)$ y $x_2(k)$ que representan el estado de carga de la batería y el nivel del tanque de hidrógeno, respectivamente. Estos dispositivos de almacenamiento disponen de convertidores de energía que para el primer caso es el cargador de baterías y el convertor DC/DC, mientras que para el caso del hidrógeno, se tiene un electrolizador y una pila de combustible, los mismos que se encargan de cargar y descargar la energía de estos dispositivos.

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \\
 \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,85 & -1,1236 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & 0,7 & -1,538 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ u_4(k) \\ u_5(k) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Además, el equilibrio de energía en el Bus DC se cumple de acuerdo a la ecuación 5.6, tomando en cuenta que la manipulación del generador termo-eléctrico, del electrolizador y pilas de combustible son añadidos a los valores de generación de las dos fuentes principales y las demandas industrial y residencial.

$$E_u u(k) + E_d d(k) = 0$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ u_4(k) \\ u_5(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix} = 0 \quad (5.4)$$

Las restricciones para esta topología vienen dadas por las siguientes condiciones: El tamaño del banco de baterías se considera asumiendo una autonomía de 3 horas a máxima carga, tomando en cuenta el nivel de seguridad y el estado inicial de carga, para este escenario se toma de 300 KWh. Por otro lado, el tamaño del tanque de hidrógeno se asume siguiendo el mismo criterio, en este caso con una autonomía de 4 horas a máxima carga, asumiendo una producción de 60 KWh/Kg H₂ [80]. El estado de carga inicial y de seguridad del banco de baterías es del 90 % y 40 %, respectivamente. El nivel mínimo de carga del tanque de hidrógeno se considera del 20 % por seguridad de reserva en caso de escasez, y su nivel inicial del 90 %. El tamaño de los convertidores de energía, se elige luego de analizar varios resultados que arroja el algoritmo de optimización durante una serie de iteraciones. Los valores de rendimiento se toman de la Tabla 4.5 del Capítulo 4, buscando el mejor equilibrio en cada caso. Estos valores son resumidos en la Tabla 5.6, donde se destacan la disminución considerable del tamaño de las baterías gracias a la inclusión del generador termo-eléctrico el mismo que también posee una restricción de generación dada por el tema de producción de gases de efecto invernadero indeseables en este tipo de sistemas de energías renovables.

En este caso, el estado inicial de carga se considera igual al 90 % en los dos dispositivos, sin embargo el nivel de seguridad del hidrógeno se considera del 20 % a diferencia de la batería que se mantiene en 40 %. El tamaño de los convertidores de energía también se ven reducidos a un valor de 100KW en los cuatro casos. Por otro lado, los factores de rendimiento de los convertidores de energía como del electrolizador y pila de combustible son inferiores a los de carga y descarga de batería, los cuales incidirán de manera directa sobre el comportamiento de carga y descarga del tanque de hidrógeno y el banco de baterías.

5.3.3. Parámetros de Simulación

Para este caso los valores de tiempo de muestreo y horizonte de predicción se mantienen constantes debido a las razones señaladas en la subsección 5.2.3, no así los pesos de la función objetivo los mismos que varían con respecto al caso anterior en cinco unidades menos para el peso económico y en 3 unidades más para el peso del factor de seguridad, mientras que el peso del factor de estabilidad permanece constante como se aprecia en la Tabla 5.7.

Tabla 5.6: Restricciones del Sistema

Característica	Banco de Baterías	Hidrógeno
Tamaño	300 KWh	20 Kg
Estado Inicial de Carga	90 %	90 %
Estado de Carga de Seguridad	40 %	20 %
Cargador de Baterías	100 KW	-
Convertor DC/DC	100 KW	-
Electrolizador	-	100 KW
Pila de Combustible	-	100 KW
Rendimiento de Carga y Descarga	0.85	-
Rendimiento del Electrolizador	-	0.70
Rendimiento de la Pila de Combustible	-	0.65

Tabla 5.7: Parámetros del Algoritmo de Control MPC

Característica	Valor
Período de Muestreo	1 hora
Horizonte de Predicción	24 horas
Peso Económico (W_e)	15
Peso de Seguridad (W_x)	8
Peso de Suavidad (W_u)	0.1

5.3.4. Resultados

Uno de los primeros resultados que se obtienen en este caso es la proporción de energía generada por cada una de las fuentes conectadas al sistema, como se ilustra en la Figura 5.11, donde la energía eólica es la que mayor cantidad aporta a la red, seguido por la termo-eléctrica y la solar con porcentajes que se detallan en la Tabla 5.5. Además en este caso se toman en cuenta el aporte energético que tiene la pila de combustible y las baterías complementariamente, destacando el aporte del hidrógeno en los momentos en los cuales se aprecia una mayor cantidad de energía renovable en los meses de enero, febrero y marzo. Por otro lado, en el mes de agosto se ve un aumento en el aporte de energía por parte del generador termo-eléctrico, siendo éste un comportamiento esperado y un tanto lógico, debido a la disminución de energía renovable y los dispositivos de almacenamiento.

El aspecto económico [79, 80] se resume en la Tabla 5.8 y gráficamente se ilustra en la

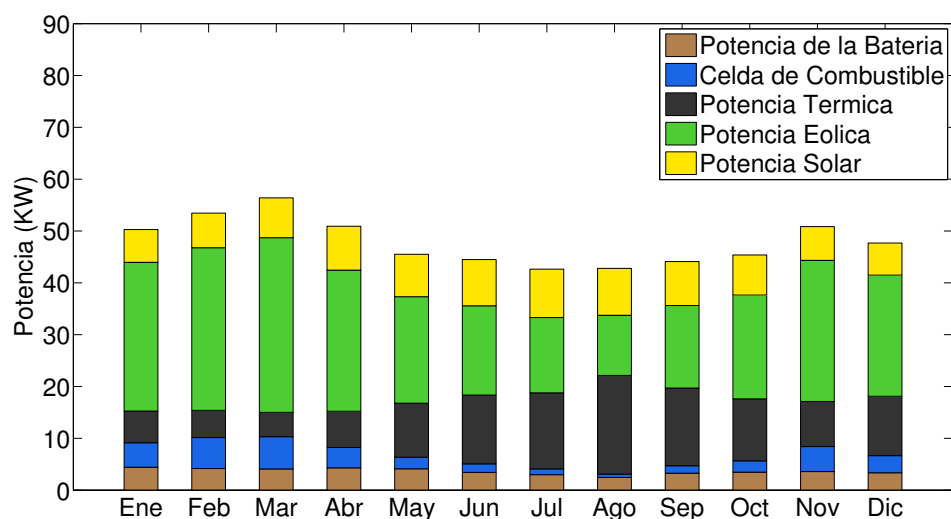


Figura 5.10: Aporte de Energía en Sistema Híbrido Aislado Ampliado

Tabla 5.8: Costo Total del Sistema Híbrido Aislado Ampliado

Componente	Tamaño	Costo de Instalación (USD/KW) o (USD/Kg)	Total (USD)
Paneles Solares	80 KW	6,182	494,560
Turbinas Eólicas	120 KW	1,973	236,760
Generador Termo-eléctrico	75 KW	1,817	136,275
Banco de Baterías	300 KWh	400	120,000
Pila de Combustible	100 KWh	5,459	545,900
Electrolizador	100 KWh	400	40,000
Tanque de Hidrógeno	40 Kg	250	10,000
Total del Sistema	-	-	1'583.495

Figura 5.11 donde se aprecia que el dispositivo más costoso es la Pila de Combustible (FC), seguida por la de los paneles solares (PS) y las turbinas eólicas o aerogeneradores (AG), mientras que el tanque de hidrógeno (H2) representa el elemento más económico, seguido por el electrolizador (ELEC), banco de baterías (BB) y finalmente el generador termo-eléctrico (GTE). Si se hace una breve comparación con la topología anterior, económicamente se logra una reducción del costo del sistema en aproximadamente 30 veces, haciendo a este sistema muchísimo más accesible para instalaciones a gran escala.

Cabe destacar que los parámetros ingresados al algoritmo determinan este compor-

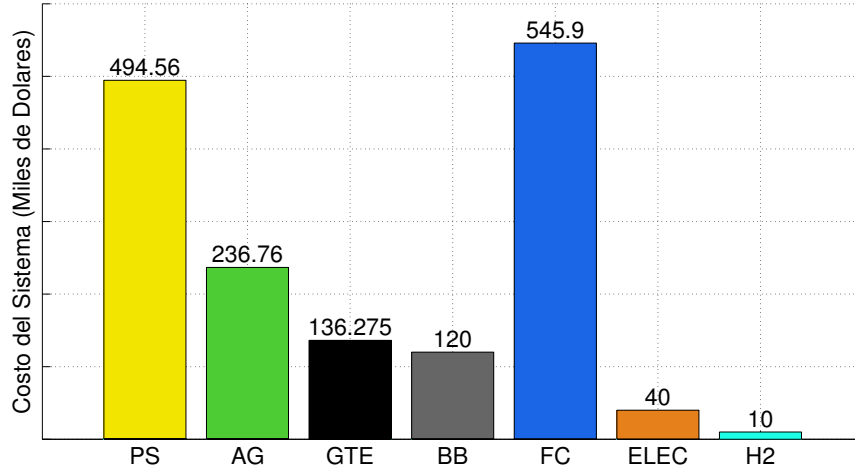


Figura 5.11: Costo por Tipo de Fuente de Generación

tamiento, pudiendo incluso mejorar la respuesta actual con dispositivos de otras características, cuyos rendimientos sean superiores y sus costos más accesibles. Además, la restricción de potencia y peso impuesta en la función objetivo al generador termoelectrico permite reducir su consumo de energía de manera considerable.

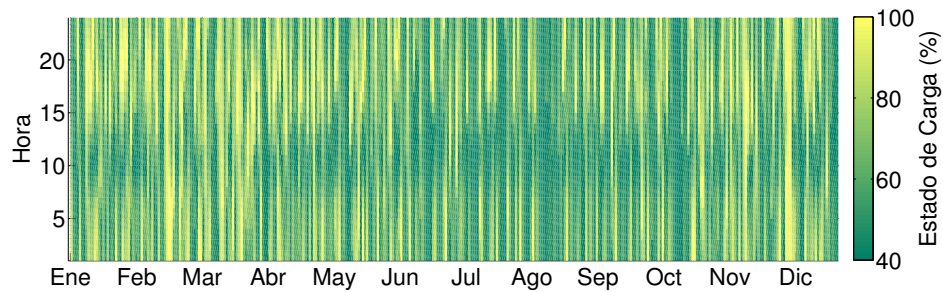


Figura 5.12: Distribución Anual del Estado de Carga del Banco de Baterías

Por otro lado, en la Figura 5.12 se representa la evolución del estado de carga del Banco de Baterías en un período de un año, teniendo como escala horizontal los meses del año y las horas del día como escala vertical. La intensidad de color más clara denota un nivel de llenado, mientras que el color oscuro un vaciado, tomando en cuenta que la escala de la barra lateral se maneja de 40 % a 100 %, rango de operación del Banco de Baterías. Además, en la Figura 5.13, se aprecia el estado de carga del banco de baterías para un período de 250 horas, mientras que en la Figura 5.14 se muestra la señal de manipulación de carga y descarga del banco de baterías para el mismo período de tiempo.

En la Figura 5.15 se ilustra la frecuencia con la cual el estado de carga permanece en cada

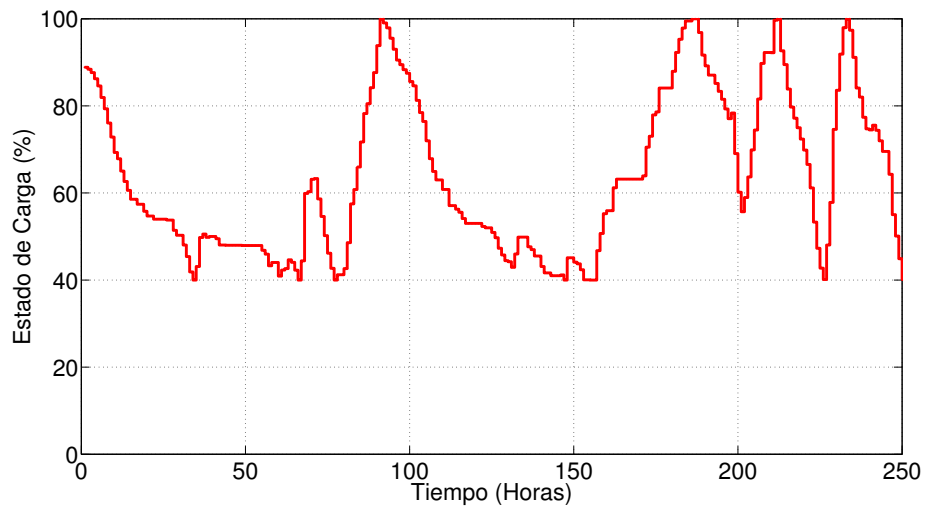


Figura 5.13: Estado de Carga del Banco de Baterías

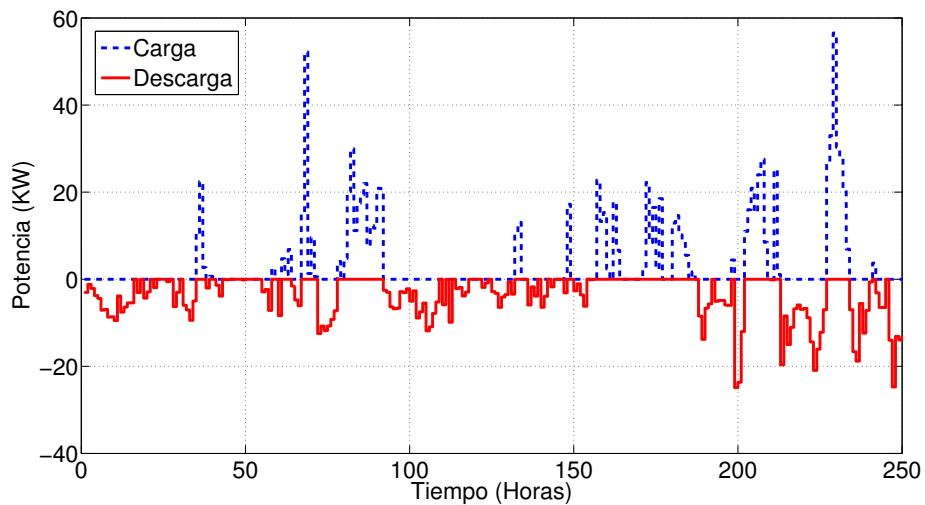


Figura 5.14: Señales de Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías

nivel, donde esta gráfica es de mucha utilidad para determinar si el dispositivo esta siendo usado de manera adecuada. En este caso se puede deducir que el Banco de Baterías tiene una actividad de carga y descarga bastante frecuente lo que incidirá directamente en la reducción de su tiempo de vida útil.

En la Figura 5.16 se representa la evolución anual de nivel del Tanque de Hidrógeno, pudiendo notar en este caso que el tanque permanece una porción bien grande del tiempo en los niveles más bajos, sin embargo existen también instantes en los cuales se obtiene un llenado completo. Además, en la Figura 5.17 se muestra el nivel del tanque de hidrógeno para un periodo de 250 horas, donde se aprecia que el valor mínimo al cual llega es al 20%.

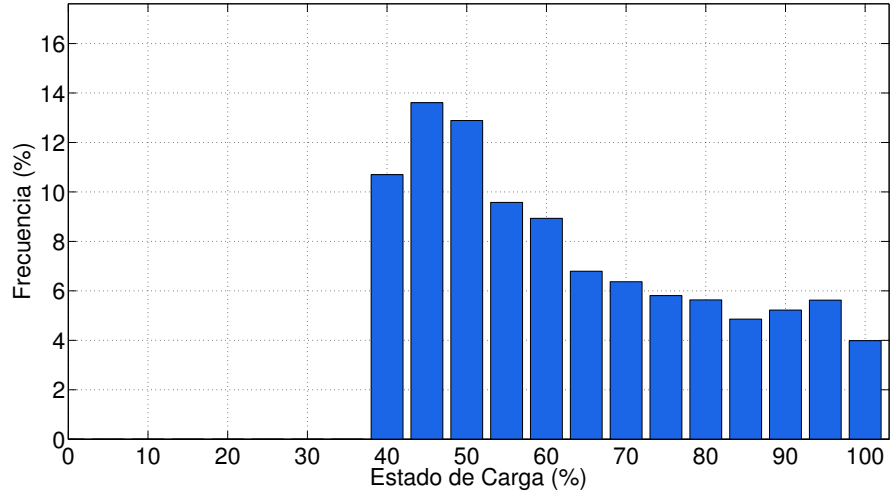


Figura 5.15: Frecuencia del Estado de Carga Sistema Híbrido Aislado Ampliado

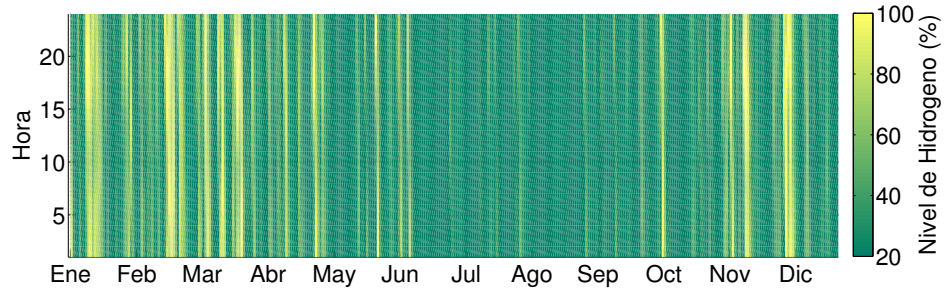


Figura 5.16: Distribución Anual del Nivel del Tanque de Hidrógeno

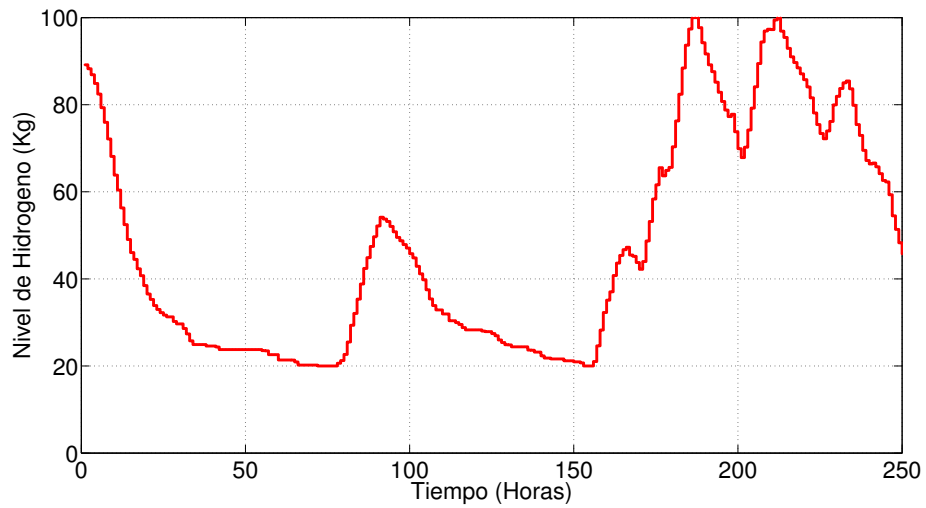


Figura 5.17: Nivel del Tanque de Hidrógeno

cumpliendo así una de las restricciones consideradas al inicio.

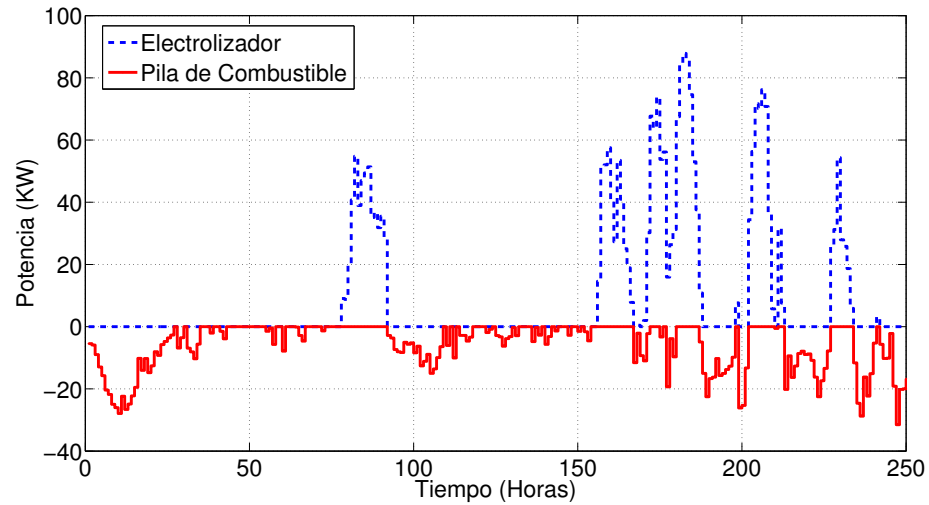


Figura 5.18: Señales de Manipulación del Electrolizador y la Pila de Combustible

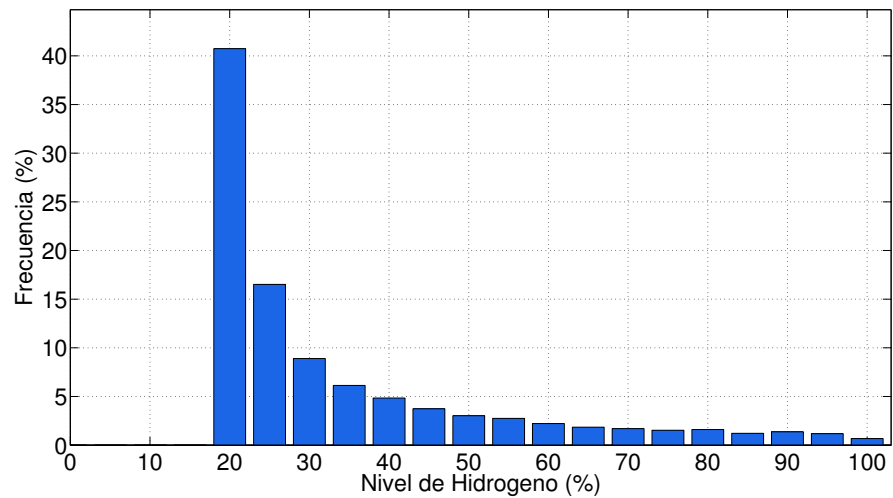


Figura 5.19: Frecuencia del Nivel del Tanque de Hidrógeno Sistema Híbrido Aislado Ampliado

En la Figura 5.18 se muestran las señales de manipulación tanto del electrolizador como de la Pila de Combustible, para un periodo de 250 horas, mientras que en la Figura 5.19 se muestra la frecuencia del nivel de hidrógeno, donde alrededor del 40 % del tiempo el nivel del tanque permanece en su valor más bajo, considerando como valor mínimo de carga y nivel de seguridad un 20 % de su tamaño. Esto puede dar la pauta para considerar que el tamaño del tanque esta siendo sobredimensionado, sin embargo al observar detenidamente se aprecia que los momentos en los cuales existe mayor generación de energía renovable, es en los meses de

febrero y marzo, coincidiendo con la subida en los niveles de carga de baterías y tanque de hidrógeno, de manera que la posibilidad de un sobredimensionamiento podría ser descartada por el momento.

5.4. Escenario 3: Sistema Conectado a la Red Pública

El sistema conectado a la Red Pública se caracteriza por tener una conexión física al suministro eléctrico de un sistema convencional de distribución; en este caso, se considera una fuente de generación principal, de naturaleza no renovable, es decir en el proceso de generación provoca contaminación ambiental. A diferencia del caso anterior el flujo de energía es bidireccional, permitiendo exportarla cuando los dispositivos de almacenamiento hayan alcanzado sus niveles máximos de carga, o importarla cuando estos hayan agotado su nivel de carga, lo que a priori se deduce que permitirá reducir el tamaño de los dispositivos de almacenamiento e incluso, si así se deseara, eliminarlos por completo.

La topología anterior se mantiene en su gran mayoría, siendo la gran diferencia esta conexión bidireccional que permitirá evaluar el comportamiento del sistema ante este tipo de configuración y ver las diferencias entre las anteriores topologías. En la Figura 5.20 se aprecia la nueva topología con los elementos mencionados anteriormente, donde se nota que la exportación e importación de energía sera minimizada gracias a las señales óptimas calculadas por el algoritmo y aplicadas a los convertidores, esto significa que el sistema hará uso de la red pública únicamente cuando sea necesario cubrir la demanda y no para cargar los dispositivos de almacenamiento o en su defecto descargarlos para exportar energía.

5.4.1. Generación

La característica fundamental de esta topología es la presencia de una conexión directa a la red pública, que además de servir como respaldo de energía, ayuda a disminuir el tamaño de los dispositivos de almacenamiento, uno de los componentes más costosos en este tipo de sistemas. Al igual que el caso anterior, esta energía es de carácter no renovable lo que contradice la instalación de un sistema renovable junto a este, sin embargo si se analiza desde el punto de vista de respaldo y soporte en casos en los cuales el sistema híbrido es incapaz de proveer energía, la conexión a la red pública es una buena alternativa, por sus múltiples ventajas.

En la Figura 5.21 se aprecia el perfil de generación de las tres fuentes de energía que forman parte del sistema híbrido y en la Tabla 5.9 se condensa la información referente al porcentaje de aporte y capacidades netas instaladas, destacando que la energía solar tiene un aporte del 18.98%, mientras que la eólica y la red pública lo hacen con 55.09% y 25.92% respectivamente.

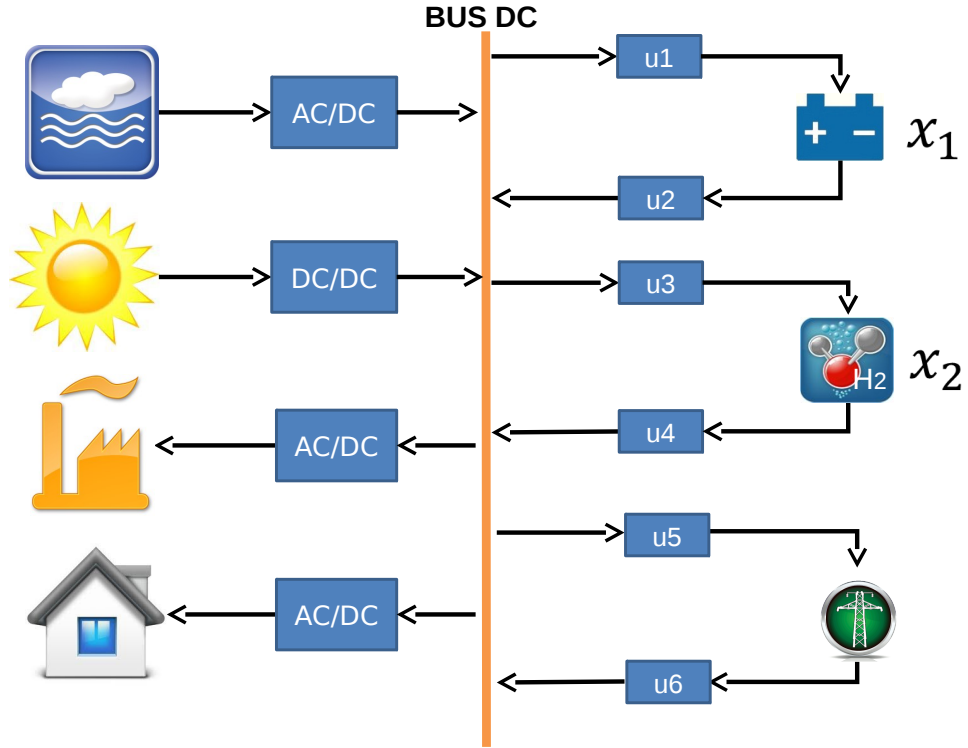


Figura 5.20: Sistema Conectado a la Red Pública

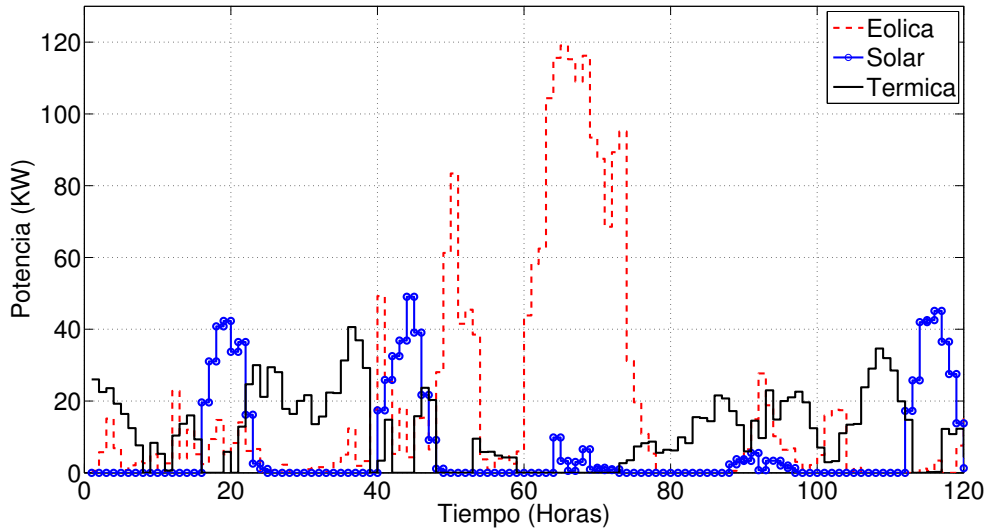


Figura 5.21: Perfil de Generación Eólica, Solar y Red Pública

5.4.2. Algoritmo de Control

El modelo del sistema representado en espacio de estados puede definirse por medio de la ecuación 5.5, donde se identifican dos variables de estado $x_1(k)$ y $x_2(k)$ que representan

Tabla 5.9: Potencia de Generación Eólica, Solar y Térmica

Componente	Paneles Solares	Turbinas Eólicas	Red Pública
Potencia Instalada	40 KW	120 KW	90 KW
Potencia Media	7.78 KW	22.59 KW	13.47 KW
Factor de Carga	19.45 %	18.83 %	14.97 %
Producción Total	68,174 KWh/año	197,880 KWh/año	117,630 KWh/año
Aporte	17.77 %	51.57 %	30.66 %

el estado de carga de la batería y el nivel del tanque de hidrógeno, respectivamente. Estos dispositivos de almacenamiento disponen de convertidores de energía que para el primer caso es el cargador de baterías y el convertor DC/DC, mientras que para el caso del hidrógeno, se tiene un electrolizador y una pila de combustible, los mismos que se encargan de cargar y descargar la energía de estos dispositivos. Adicionalmente, se nota la presencia de una nueva variable de manipulación para la exportación de energía a la red pública, $u_6(k)$.

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \\
 \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,85 & -1,1236 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & 0,7 & -1,538 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ u_4(k) \\ u_5(k) \\ u_6(k) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix} \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

Nuevamente, el equilibrio de energía en el Bus DC se cumple según la ecuación 5.6, considerando adicionalmente la manipulación de exportación de energía a la red pública, a las presentes en el caso anterior como las del cargador del banco de baterías y convertor DC/DC, electrolizador y pilas de combustible, así como los valores de generación de las dos fuentes principales y las demandas industrial y residencial.

$$E_u u(k) + E_d d(k) = 0$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ u_4(k) \\ u_5(k) \\ u_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \\ d_4(k) \end{bmatrix} = 0 \quad (5.6)$$

Las restricciones para esta topología varían con respecto al caso anterior gracias a la inclusión de la conexión a la red pública, junto con la limitación de importación y exportación, donde el aspecto más representativo es la disminución considerable del tamaño de los convertidores conectados al sistema cuyos valores que se resumen en la Tabla 5.10.

En este caso también, el estado inicial de carga se considera igual al 90 % en los dos dispositivos, sin embargo el nivel de seguridad del hidrógeno en esta ocasión se considera igual a 0 % a diferencia de la batería que se mantiene en 40 %. El tamaño de los convertidores de energía también se ven reducidos a un valor de 50KW en los cuatro casos, mientras tanto que los límites para importar y exportar se establecen en 90KW.

Tabla 5.10: Restricciones del Sistema

Característica	Banco de Baterías	Hidrógeno
Tamaño	150 KWh	4 Kg
Estado Inicial de Carga	90 %	90 %
Estado de Carga de Seguridad	40 %	0 %
Cargador de Baterías	50 KW	-
Convertor DC/DC	50 KW	-
Electrolizador	-	50 KW
Pila de Combustible	-	50 KW
Rendimiento de Carga y Descarga	0.85	-
Rendimiento del Electrolizador	-	0.70
Rendimiento de la Pila de Combustible	-	0.65

5.4.3. Parámetros de Simulación

El tiempo de muestreo y horizonte de predicción se mantienen constantes también en esta topología, mientras que los pesos de la función objetivo varían a 25 unidades para el

peso económico y a 12 para el peso del factor de seguridad, mientras que el peso del factor de estabilidad permanece constante como se aprecia en la Tabla 5.11. Estas constantes varían, de caso a caso, debido a que cada uno de ellos tiene su particularidad, ya sea la adición una nueva fuente de generación o de un dispositivo de almacenamiento, los cuales poseen sus respectivas acciones de control a ser minimizadas y requieren de ponderaciones distintas para alcanzar los resultados propuestos. Además, al no haber un criterio formal de selección de estas constantes, su determinación se vuelve experimental.

Tabla 5.11: Parámetros del Algoritmo de Control MPC

Característica	Valor
Período de Muestreo	1 hora
Horizonte de Predicción	24 horas
Peso Económico (W_e)	25
Peso de Seguridad (W_x)	12
Peso de Suavidad (W_u)	0.1

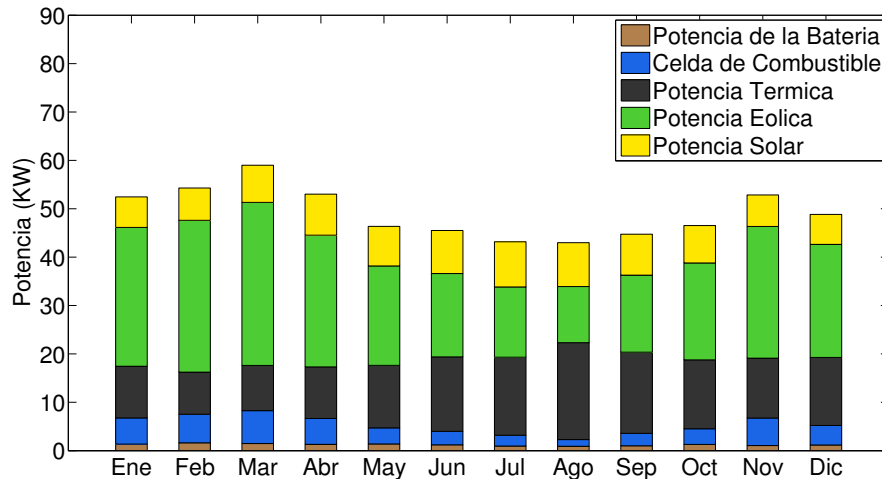


Figura 5.22: Aporte de Energía en Sistema Conectado a la Red Pública

5.4.4. Resultados

Uno de los primeros resultados que se obtienen es la proporción de energía generada por cada una de las fuentes conectadas al sistema, como se ilustra en la Figura 5.22, donde la energía eólica es la que mayor cantidad aporta a la red, seguido por la termo-eléctrica y la solar con porcentajes que se detallan en la Tabla 5.9. Además en este caso se toman en cuenta el aporte energético que tiene la pila de combustible y las baterías, destacando el aporte del

hidrógeno que es mayor que en el caso anterior en los momentos que existe mayor cantidad de energía renovable en los meses de enero, febrero y marzo. Por otro lado, al igual que el caso anterior, en el mes de agosto se ve claramente un aumento en la importación de energía desde la red pública y una reducción casi total del aporte de la pila de combustible, un comportamiento esperado debido a la disminución de energía renovable y del estado de carga de los dispositivos de almacenamiento.

Tabla 5.12: Costo Total del Sistema

Componente	Tamaño	Costo de Instalación (USD/KW) o (USD/Kg)	Total (USD)
Paneles Solares	80 KW	6,182	494,560
Turbinas Eólicas	120 KW	1,973	236,760
Convertor AC/DC	90 KW	1,000	90,000
Convertor DC/AC	90 KW	1,000	90,000
Banco de Baterías	150 KWh	400	60,000
Pila de Combustible	50 KWh	5,459	272,950
Electrolizador	50 KWh	400	20,000
Tanque de Hidrógeno	4 Kg	250	1,000
Total del Sistema	-	-	1'265.270

El aspecto económico se resume en la Tabla 5.12 y gráficamente se ilustra en la Figura 5.22 donde se aprecia que los paneles solares (PS) son los dispositivos más costosos del sistema, seguido por la Pila de Combustible (FC), y las turbinas eólicas o aerogeneradores (AG). Por otro lado los restantes dispositivos se ven reducidos considerablemente su precio gracias a la conexión a la red pública lo que permite tener energía disponible en los momentos más críticos. Comparando con el sistema anterior, económicamente se logra una reducción del 20 % del costo del sistema, haciendo a este más accesible y sin la generación de contaminantes de manera directa por la presencia de un generador termo-eléctrico dentro de la instalación.

En esta topología se aprecia la ventaja de utilizar una conexión directa a la red pública, donde el algoritmo toma en cuenta los valores de eficiencia de cada uno de los dispositivos y sobre todo los pesos de la función objetivo para optimizar la carga de los dispositivos de almacenamiento y seleccionar que energía es la más adecuada en cada instante de tiempo, logrando reducir el tamaño de los dispositivos y sobre todo con los datos ingresados entregar la mejor solución.

Por otro lado, en la Figura 5.24 se representa la evolución del estado de carga del Banco

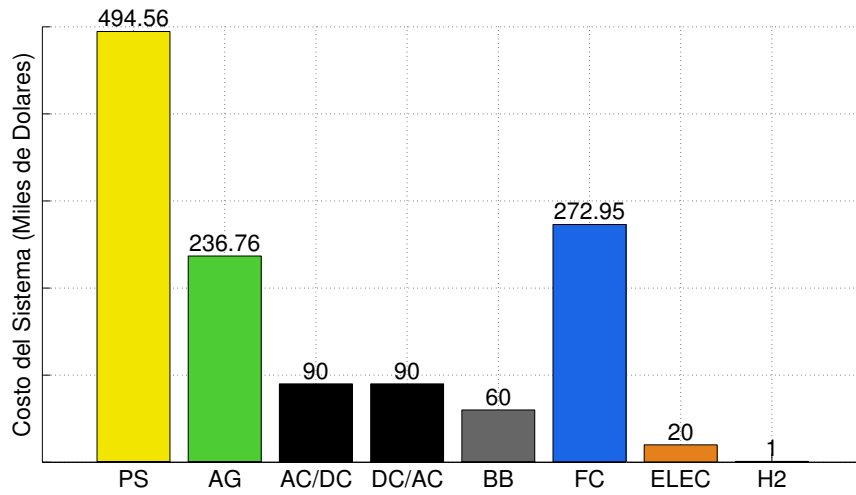


Figura 5.23: Costo por Tipo de Fuente de Generación

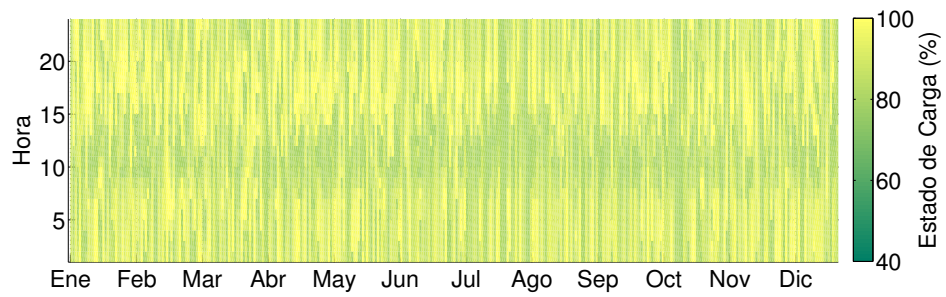


Figura 5.24: Distribución Anual del Estado de Carga del Banco de Baterías

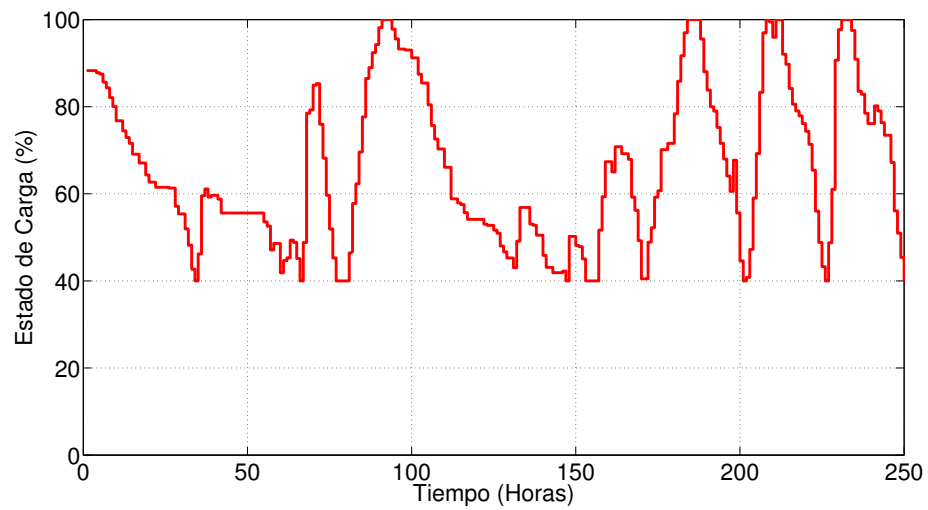


Figura 5.25: Estado de Carga del Banco de Baterías

de Baterías en un período de un año, teniendo como escala horizontal los meses del año y las horas del día como escala vertical. La intensidad de color más clara denota un nivel de llenado, mientras que el color oscuro un vaciado, tomando en cuenta que la escala de la barra lateral se maneja de 40 % a 100 %, rango de operación del Banco de Baterías. En la Figura 5.25 se aprecia el estado de carga del banco de baterías para un lapso de tiempo de 250 horas.

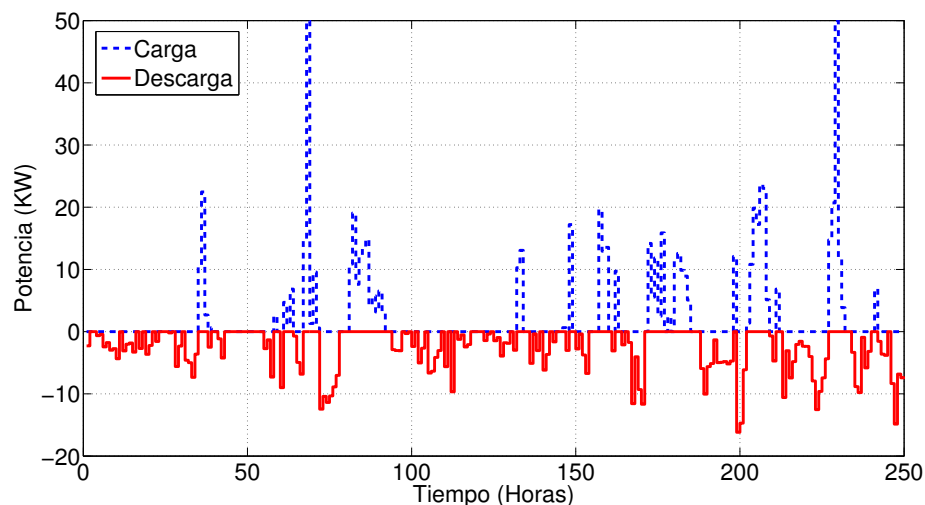


Figura 5.26: Manipulación de Carga y Descarga del Banco de Baterías

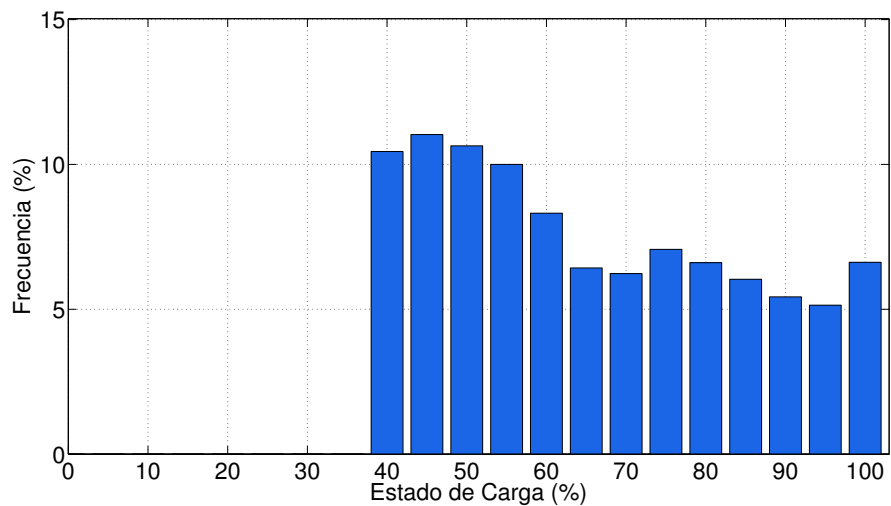


Figura 5.27: Frecuencia del Estado de Carga en Sistema Conectado a la Red Pública

Además, en la Figura 5.26 se aprecia las señales de manipulación de carga y descarga del banco de baterías para un intervalo de 250 horas. Por otra parte, observando la Figura 5.27 se puede deducir que la actividad de carga y descarga del Banco de Baterías es bastante alto

ya que la frecuencia de carga y descarga oscila entre el 5% y 10%, para un estado de carga que va desde su valor mínimo a su valor máximo.

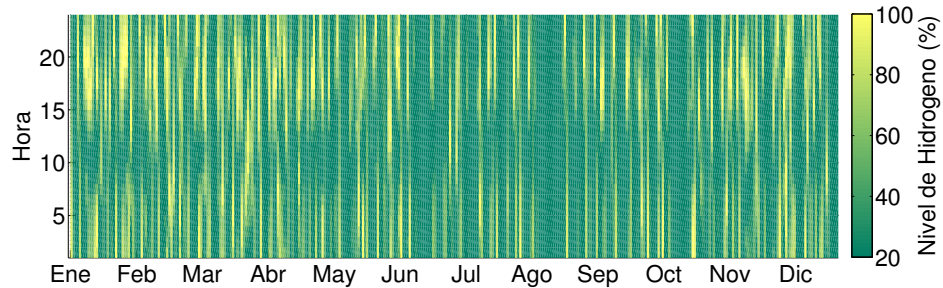


Figura 5.28: Distribución Anual de Nivel del Tanque de Hidrógeno

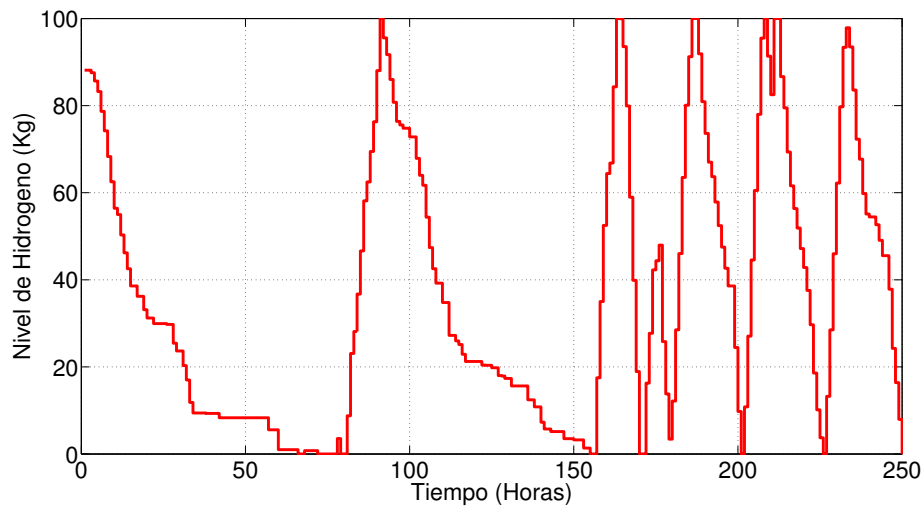


Figura 5.29: Distribución Anual de Nivel del Tanque de Hidrógeno

Del mismo modo que el Banco de Baterías, en la Figura 5.28 se representa la evolución del nivel del Tanque de Hidrógeno para el mismo periodo de tiempo y con la misma distribución de ejes, pudiendo notar que a diferencia del caso pasado, en este caso que el tanque presenta un comportamiento más oscilatorio debido a la reducción de su tamaño y al margen de seguridad mínimo, permitiendo que el mismo se pueda descargar completamente, como se observa en la Figura 5.29, donde se muestra la curva de nivel del tanque de hidrógeno para un periodo de 250 horas.

Por otra parte, en la Figura 5.30 se aprecia la manipulación del electrolizador y la pila de combustible para un periodo de 250 horas, donde se ve que hay carga y descarga de este gas al mismo tiempo, este comportamiento se permite debido a que son dispositivos independientes. Finalmente en la Figura 5.31 aprecia que la mayor parte del tiempo el tanque permanece

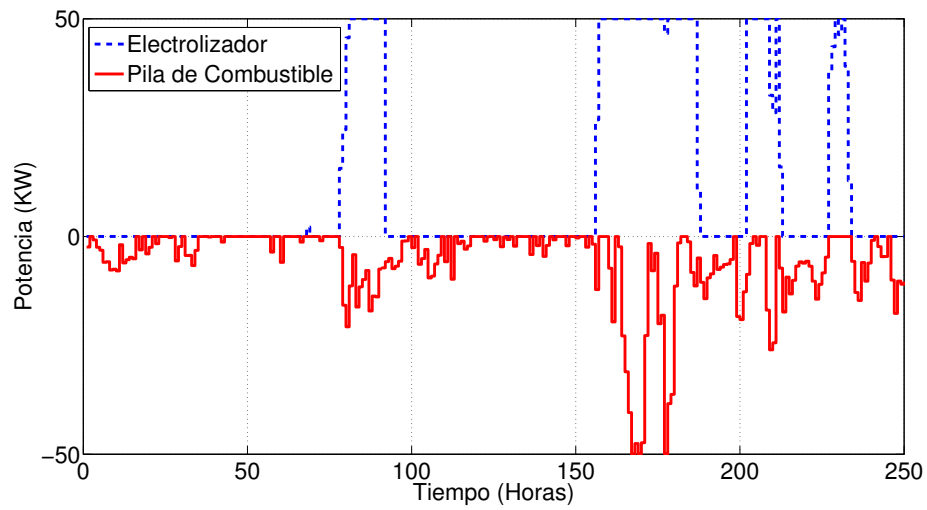


Figura 5.30: Manipulación del Electrolizador y Pila de Combustible

en niveles bajos de carga, pero al mismo tiempo realiza cargas y descargas regulares, comportamiento que se podría considerar óptimo tanto para la dinámica del sistema como en su tiempo de vida útil.

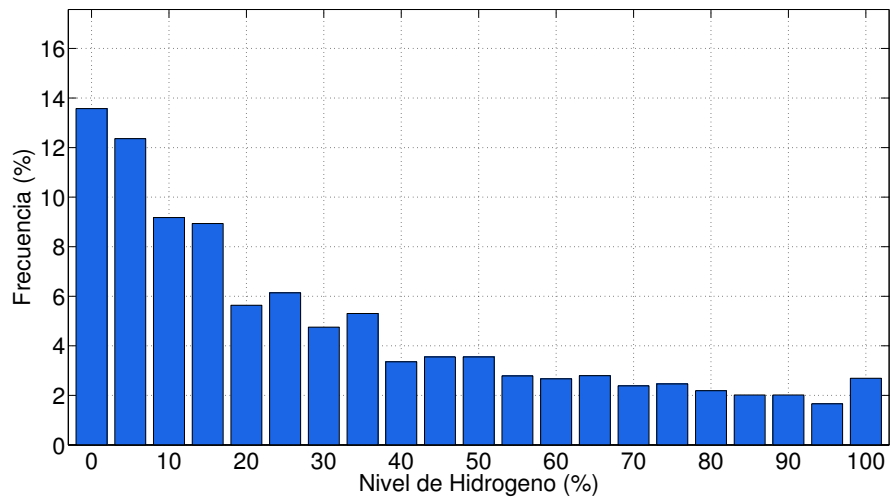


Figura 5.31: Frecuencia de Nivel del Tanque de Hidrógeno

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este último capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación, así como el estudio a futuro que se puede realizar en el área de las redes híbridas de energía renovable. En la sección 6.1 se presenta las conclusiones de la tesis y en la sección 6.2 se describen los posibles trabajos futuros.

6.1. Conclusiones

Este trabajo se basó principalmente en el diseño de una estrategia de control que permitiera el despacho y almacenamiento de energía renovable en sistemas híbridos, que fuera capaz de calcular de manera anticipada las acciones de control óptimas sobre los convertidores de energía, con el fin de alcanzar la mejor solución posible al flujo de energía en la red. Este trabajo permite extraer algunas conclusiones valiosas que se resumen a continuación.

- Se desarrolló una metodología de modelado de un sistema híbrido de energía renovable, inspirada en redes de distribución de agua potable, donde el flujo de líquido se traduce como flujo de energía eléctrica, los elementos de control como válvulas y bombas como convertidores de energía, en este caso convertidores estáticos DC/DC, AC/DC, DC/AC, electrolizadores y pilas de combustible, y los depósitos de agua como dispositivos de almacenamiento como baterías y tanques de hidrógeno, los mismos que pueden ser representados en un modelo en espacio de estados. En esta representación se desarrollaron tres escenarios de operación, donde se combinan adecuadamente estos elementos que normalmente se encuentran en los sistemas híbridos de energía renovable, para alimentar demandas de tipo residencial e industrial, donde se pudieron analizar los beneficios de la estrategia de control para encontrar la solución óptima en cada escenario propuesto. Además, para hacer más amigable el ingreso de parámetros y visualización de resultados, se desarrolló una herramienta de software que será de utilidad para futuros estudios.
- Una de las ventajas del Control de Modelo Predictivo, es que puede predecir las acciones de control a tomar sobre los convertidores de energía en un horizonte de predicción seleccionado adecuadamente. En los tres escenarios propuestos, este horizonte fue de 24 horas, el mismo que coincide con la periodicidad de los perfiles de generación y demanda. Esta ventaja permite asignar de manera anticipada las *tareas* de cada convertidor y

repartir el trabajo sobre los integrantes del sistema de tal forma que los cambios en los valores de referencia se ven reducidos, disminuyendo la magnitud de los transitorios y ofreciendo una mayor estabilidad al sistema completo.

- En sistemas híbridos de energía renovable con topología aislada, es decir sin conexión a la red pública y con un solo dispositivo de almacenamiento, como en el primer escenario, se pudo determinar que es necesario un banco de baterías extremadamente grande para poder abastecer la demanda de energía sin interrupciones durante todo el año. Sin embargo, a pesar del gran tamaño, no se puede asegurar su correcta operación para el año siguiente debido a que el nivel de carga del banco de baterías disminuyó casi un 40 %, debido principalmente a la intermitencia de las fuentes de generación y el perfil de demanda residencial e industrial.
- Por otra parte, en sistemas híbridos de energía renovable a los cuales se les agrega un nuevo dispositivo de almacenamiento y una fuente de generación predecible y controlable, en este caso un generador térmico, se puede reducir en gran medida la incertidumbre de las fuentes de energía limpia, de tal forma que se pueden bajar significativamente los costos de la instalación y brindar una mayor confiabilidad en el suministro de energía eléctrica a los consumidores. Sin embargo, persiste la emisión de gases de efecto invernadero emanados del generador térmico, lo cual contradice el concepto de energías renovables.
- En los sistemas que poseen conexión a la red pública, los resultados son más alentadores, ya que permite ofrecer al sistema una confiabilidad más alta en el servicio y los dispositivos de almacenamiento pueden reducir su tamaño considerablemente, gracias a disponibilidad de la conexión que permite importar y/o exportar energía. En este caso, la emisión de gases de efecto invernadero estará en función del tipo de fuente usada para generar energía de la red pública, que aún depende de combustibles fósiles, como se vio en el Capítulo 2. Sin embargo, no siempre se cuenta con este tipo de conexión, ya que los proyectos de energías renovables muchas veces se encuentran en lugares remotos.
- Los sistemas híbridos de energía renovable permiten reducir los costos totales de la instalación, en términos de fuentes de generación y dispositivos de almacenamiento, en vista que cubren de una manera más uniforme la demanda de energía, gracias a que combinan fuentes de generación de distinta naturaleza cuyas curvas de potencia no dependen únicamente de una variable climática, sino al contrario, en algunos casos se complementan. Además, el creciente desarrollo de la tecnología en fuentes de generación, convertidores y dispositivos de almacenamiento, hace pensar en los próximos años se cuenten con sistemas mucho más eficientes y económicos.
- Una de las principales dificultades del control de modelo predictivo, fue la sintonización de los parámetros y pesos de la función objetivo, los mismos que definen la optimización de las variables de manipulación futura y por ende el rendimiento del sistema. En esta ocasión los coeficientes que forman parte de las matrices de ponderación, fueron determinados de manera experimental, quedando su procedimiento de selección a criterio de

la persona que realiza la sintonización del controlador. Esta forma una tanto subjetiva de selección, puede ser compensada con múltiples iteraciones y análisis de los resultados obtenidos, de manera que se logre llegar a una respuesta razonable.

- El uso de sistemas híbridos de energía a nivel mundial han crecido de manera exponencial gracias a sus ventajas. En este caso los datos fueron tomados del estado de Texas en Estados Unidos, el cual es uno de los mayores productores de energía renovable del planeta. Sin embargo, este tipo de sistemas pueden ser instalados en otras ubicaciones, donde el dimensionamiento y costo dependerá directamente de las condiciones climáticas reinantes en la zona, el perfil de carga de consumo y los costos asociados a la instalación y los equipos. Una de las bondades de la estrategia de control propuesta es que permite analizar diferentes topologías y tamaños, independientemente de la ubicación geográfica seleccionada.

6.2. Trabajos Futuros

A continuación se describen algunos de los trabajos que se pueden agregar a este trabajo de investigación de manera que se pueda enriquecer su contenido y aumentar el potencial del algoritmo propuesto.

- Una de las características más importantes del control de modelo predictivo es su capacidad de predecir las acciones de control óptimas que deberán ser tomadas a futuro. Esta capacidad depende en gran medida de la información, también a futuro, con la que cuenta el MPC para realizar la optimización. Justamente, en esta línea de investigación queda trabajo por realizar en cuanto al desarrollo de algoritmos de predicción de las condiciones climáticas, como son velocidad de viento e irradiación solar, útiles para conocer con anterioridad la capacidad de generación disponible en cada instante de tiempo.
- Por otro lado, el desarrollo de algoritmos de auto-sintonía de los parámetros del MPC serían de gran utilidad al momento de encontrar el comportamiento más adecuado para este tipo de controladores. Además, el estudiar la incertidumbre existente entre cada acción de control futura y el costo que esto representa, en términos económicos y en tiempo de vida útil de los equipos, ayudaría a depurar aún este trabajo de tesis.
- Estudiar el efecto que tienen los pesos de la función objetivo sobre los resultados obtenidos, y su impacto en el dimensionamiento de los dispositivos y el costo final de los mismos, permitiría disponer de información que pudiera usarse para evaluar si la función objetivo propuesta es la mejor o si se puede proponer otras que tengan mejores resultados.
- Finalmente, el estudiar y analizar una mayor cantidad de escenarios y casos de simulación, ayudaría a validar y depurar este algoritmo, permitiendo orientar el estudio a situaciones más particulares y con mayor nivel de detalle que las actuales.

Anexo A

Formulación Matemática de un MPC

Considerar un sistema discreto representado en espacio de estados, como el siguiente:

$$x(k+1) = A_n x(k) + B_m u(k) + B_p d(k) \quad (\text{A.1})$$

Donde,

$$\begin{aligned} x(k) \in \mathbb{R}^n & \text{ son las variables de estado} \\ u(k) \in \mathbb{R}^m & \text{ son las variables de manipulación} \\ d(k) \in \mathbb{R}^p & \text{ son las variables de perturbaciones} \end{aligned}$$

Para este caso en particular, las variables de estado representan los dispositivos de almacenamiento de energía, las variables de manipulación representan los convertidores estáticos los cuales permiten el paso de energía hacia el bus y las perturbaciones son la demanda de energía del sistema.

La dinámica de un sistema que cuenta con n variables de estados, m_i señales de control y m_p señales de perturbación puede ser representada usando espacio de estados como se muestra a continuación:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix}}_{n \times 1} = A_{n \times n} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}}_{n \times 1} + B_{n \times m} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}}_{m \times 1} + B_{n \times p} \underbrace{\begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ \vdots \\ d_p(k) \end{bmatrix}}_{p \times 1}$$

Simplificando su representación se tiene:

$$x_n(k+1) = A_n x_n(k) + B_m u_m(k) + B_p d_p(k) \quad (\text{A.2})$$

Si este sistema es expresado para el siguiente instante de muestreo, se tiene:

$$x_n(k+2) = A_n x_n(k+1) + B_m u_m(k+1) + B_p d_p(k+1) \quad (\text{A.3})$$

reemplazamos A.2 en A.3 se tiene:

$$x_n(k+2) = A_n^2 x_n(k) + A_n B_m u_m(k) + A_n B_p d_p(k) + B_m u_m(k+1) + B_p d_p(k+1)$$

Finalmente, si ejecutamos la misma tarea para un numero H_p de instantes de muestreo se puede representar matricialmente este conjunto de ecuaciones, como se muestra a continuacion:

$$\mathbf{X} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_n(k+1) \\ x_n(k+2) \\ \vdots \\ x_n(k+H_u) \\ \vdots \\ x_n(k+H_p) \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times 1}; \quad \sigma = \underbrace{\begin{bmatrix} A_n \\ A_n^2 \\ A_n^3 \\ \vdots \\ A_n^{H_u} \\ \vdots \\ A_n^{H_p} \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times 1} x_n(k)$$

$$\Lambda = \underbrace{\begin{bmatrix} B_m & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_n B_m & B_m & 0 & \cdots & 0 \\ A_n^2 B_m & A_n B_m & B_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_u-1} B_m & A_n^{H_u-2} B_m & A_n^{H_u-3} B_m & B_m & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_p-1} B_m & A_n^{H_p-2} B_m & A_n^{H_p-3} B_m & \cdots & \sum_i^{H_p-H_u} A_n^i B_m \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times m \cdot H_u}; \quad \mathcal{U} = \underbrace{\begin{bmatrix} u_m(k) \\ u_m(k+1) \\ u_m(k+2) \\ \vdots \\ u_m(k+H_u-1) \end{bmatrix}}_{m \cdot H_u \times 1};$$

$$\Upsilon = \underbrace{\begin{bmatrix} B_p & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_n B_p & B_p & 0 & \cdots & 0 \\ A_n^2 B_p & A_n B_p & B_p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_u-1} B_p & A_n^{H_u-2} B_p & A_n^{H_u-3} B_p & B_p & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_p-1} B_p & A_n^{H_p-2} B_p & A_n^{H_p-3} B_p & \cdots & B_p \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times m \cdot H_p}; \quad \mathcal{D} = \underbrace{\begin{bmatrix} d(k) \\ d(k+1) \\ d(k+2) \\ \vdots \\ d(k+H_u-1) \\ \vdots \\ d(k+H_p-1) \end{bmatrix}}_{m \cdot H_p \times 1};$$

Finalmente la expresion matricial del sistema en un horizonte de tiempo H_p viene dado por:

$$\mathbf{X} = \sigma + \Lambda \cdot \mathcal{U} + \Upsilon \cdot \mathcal{D} \quad (\text{A.4})$$

Anexo B

Código Fuente MPC

```
%=====
% Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
% Copyright IRI UPC – Barcelona 2010
% Autores: Vicenc Puig, Carlos Ocampo, Juan Manuel Grosso
% Modificado por: Jorge Luis Rosero 2012
%=====
clear all; clc;
disp('=====');
disp('Sistema_Hibrido_de_Energia_Renovable');
disp('=====');
disp('1)_Caso_1');
disp('2)_Caso_2');
disp('3)_Caso_3');
Caso = input('Seleccione el Caso a Simular: ');
switch(Caso)
    case 1
        load Caso1Tesis.mat
    case 2
        load Caso2Tesis.mat
    case 3
        load Caso3Tesis.mat
    otherwise
        break
end
disp('_')
disp('=====')
disp('.....Descripcion del Sistema.....')
disp('=====')
disp(Sys)
%%===== Opciones de Simulacion =====
SimOptions.centralised = 'true';
SimOptions.normalisation = 'false';
SimOptions.softConstraints = 'true';
SimOptions.nObjectives = 3;
SimOptions.dynamicalWeighting = 'false';
SimOptions.paretoFront = 'false';
```

```

SimOptions.paretoMethod = 'NNC';
SimOptions.objectivePriority = [20;5;0.1]; % [p_we;p_wx;p_wu]
SimOptions.adaptiveVolumes = 'false';
SimOptions.iniConditions = 'fixed'; % options: fixed, random)
SimOptions.refVolumes = 'beta'; % ref options: beta, xpenal)
%%===== Parametros de Simulacion =====
SimParam.Hp = 24;
SimParam.Hu = SimParam.Hp;
SimParam.niters = 8730;
SimParam.dt = 1;
Sys.B = Sys.B*SimParam.dt;
Sys.Bp = Sys.Bp*SimParam.dt;
if (SimParam.Hu>SimParam.Hp)
    error('Control horizon cannot be larger than prediction horizon');
end
n = length(Sys.A);
[~,mi] = size(Sys.B);
[~,md] = size(Sys.Bp);
Sys.D = zeros(md*SimParam.Hp,1);
Sys.DD = zeros(md*SimParam.Hp,1)';
Sys.D0 = zeros(md*SimParam.Hp,1);
Sys.umax = zeros(mi*SimParam.Hp,1);
Sys.umin = zeros(mi*SimParam.Hp,1);
SimParam.u.k = zeros(1,size(Sys.umax,2))';
for i=1:SimParam.Hp
    Sys.D0(1+(i-1)*md:i*md) = Sys.d(i,:)';
    Sys.D(1+(i-1)*md:i*md) = Sys.d(i+1,:)';
    Sys.umax(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umax1(i,:); %maximos variables
    Sys.umin(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umin1(i,:); %maximos variables
end
DeltaD=Sys.D-Sys.D0;
%%===== Pesos de la Funcion Objetivo =====
SimParam.gamma.e = SimOptions.objectivePriority(1);
SimParam.gamma.x = SimOptions.objectivePriority(2);
SimParam.gamma.u = SimOptions.objectivePriority(3);
rWe = speye(mi)*SimParam.gamma.e;
rWx = speye(n)*SimParam.gamma.x;
rWu = speye(mi)*SimParam.gamma.u;
SimParam.w.Economic = rWe;
SimParam.w.Safety = rWx;
SimParam.w.Smoothness = rWu;
%%===== Condiciones Iniciales =====
if strcmp(SimOptions.iniConditions, 'random')
    x0(i)=xmin(i)+0.8*(xmax(i)-xmin(i))
    coefs = 0.3 + 0.5*rand([length(Sys.A) 1]);
    for i=1:length(Sys.A)
        SimParam.x.k(i,1) = Sys.xmin(i) + coefs(i)*(Sys.xmax(i)-Sys.xmin(i));
    end
end

```

```

else
    if strcmp(SimOptions.iniConditions, 'fixed')
        SimParam.xin = 0.9;
        SimParam.x_k = SimParam.xin*Sys.xmax';
    else
        disp('Error: _Check_refVolumes_options_and_select_and_appropriate_one.')
        break
    end
end
switch SimOptions.refVolumes
    case 'beta'
        beta = 0.4;
        SimParam.x_s = beta*Sys.xmax';
    case 'xpenal'
        SimParam.x_s = Sys.xmin';
end
aux = SimParam.x_s - SimParam.x_k;
e0 = zeros(length(Sys.A),1);
for i=1:length(Sys.A)
    if aux>0
        e0(i) = aux(i);
    else
        e0(i) = 0;
    end
end
SimParam.E0=[];
for i=1:SimParam.Hp
    SimParam.E0 = [SimParam.E0 ; e0];
end
%%===== Resolucion MPC =====
tic
runCMPC;
toc
%%=====
%%runCMPC
%%=====
t1 = clock;
[Omega,H,Phi,omega,h,phi,CT] = QPMatrices(Sys,SimParam,SimOptions,'all');
pack
T0 = etime(clock,t1);
%%TOMLAB/CPLEX initial input matrices for QP problem
Ain = sparse([ Omega ; H ]);
b_L = sparse([-Inf*ones(length(omega),1) ; h]);
b_U = sparse([ omega ; h ]);
%=====
% Esto es para hacer que la manipulacion sea el maximo de las entradas
%=====
for i=1:SimParam.Hp

```

```

        Umax(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umax1(i,:);
        Umin(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umin1(i,:);
    end
    Umax=Umax';
    Umin=Umin';
    %%=====
    Xpenal = repmat(SimParam.x_s,SimParam.Hu,1);
    Xmin = repmat(Sys.xmin',SimParam.Hu,1);
    if strcmp(SimOptions.softConstraints,'true')
        x_L = [Umin-Umax; zeros(SimParam.Hp*n,1)];
        x_0 = [zeros(mi*SimParam.Hu,1); SimParam.E0];
        x_U = [Umax-Umin; Xpenal-Xmin];
    else
        x_L = Umin-Umax;
        x_U = Umax-Umin;
        x_0 = zeros(mi*SimParam.Hu,1);
    end
    end
    %%===== Solucion MPC =====
    u = zeros(SimParam.Hu*mi,1);
    Sim.U = zeros(mi,SimParam.niters);
    Sim.U(:,1) = SimParam.u_k;
    Sim.DU = zeros(mi,SimParam.niters);
    Sim.X = zeros(n,SimParam.niters);
    Sim.Xref = zeros(n,SimParam.niters);
    Sim.X(:,1) = SimParam.x_k;
    w_idx = zeros(SimParam.niters,1);
    tQP = zeros(SimParam.niters,1);
    constr = [];
    dTp = zeros(n,SimParam.niters);
    dTr = zeros(n,SimParam.niters);
    error = zeros(n,SimParam.niters);
    for z=1:SimParam.niters; %Aqui se ejecuta el ciclo de simulacion
        pack z
        yy=waitbar(z/SimParam.niters); %barra de simulacion
        exitFlagNorm = 1;
        Prob = qpAssign(2*Phi,phi,Ain,b_L,b_U,x_L,x_U,x_0,'Sistema_Hibrido');
        t2 = clock;
        Result = tomRun('cplex',Prob,0);
        exitflag = Result.ExitFlag;
        if (exitflag == 4)|| (exitFlagNorm == 0)
            disp('Infeasible problem. Previous predicted solution will be used.')
            Result.x_k(1:mi*SimParam.Hp) = [Result.x_k(mi+1:mi*SimParam.Hp);
            Result.x_k(mi*SimParam.Hp-mi+1:mi*SimParam.Hp)];
            if strcmp(SimOptions.softConstraints,'true')
                Result.x_k(mi*SimParam.Hp+1:(mi+n)*SimParam.Hp) =
                [Result.x_k(mi*SimParam.Hp+1+n:(mi+n)*SimParam.Hp); ...
                Result.x_k((mi+n)*SimParam.Hp-n+1:(mi+n)*SimParam.Hp)];
            end
        end
    end

```

```

end
tQP(z) = etime(clock, t2);
if strcmp(SimOptions.softConstraints, 'true')
    DeltaU = Result.x_k(1:mi*SimParam.Hp); [mdu, ndu] = size(DeltaU);
    Epsilon = Result.x_k(mi*SimParam.Hp+1:(mi+n)*SimParam.Hp);
    duOpt =
[DeltaU(mi+1:mi*SimParam.Hp, 1); DeltaU(mi*SimParam.Hp-mi+1:mi*SimParam.Hp, 1)];
    epsOpt =
[Epsilon(n+1:n*SimParam.Hp, 1); Epsilon(n*SimParam.Hp-n+1:n*SimParam.Hp, 1)];
    x_0 = [duOpt; epsOpt];
else
    DeltaU = Result.x_k;
    x_0 =
[DeltaU(mi+1:mi*SimParam.Hp, 1); DeltaU(mi*SimParam.Hp-mi+1:mi*SimParam.Hp, 1)];
end
clear Prob Result
u(1:mi) = DeltaU(1:mi)+SimParam.u_k;
for i=1:SimParam.Hu-1;
    u(1+i*mi:(i+1)*mi) = u(1+(i-1)*mi:i*mi) + DeltaU(1+i*mi:(i+1)*mi);
end
SimParam.u_k = u(1:mi);
Sim.U(:, z) = SimParam.u_k;
Sim.Jp.f1(z) = SimParam.dt*((Sys.alpha1+Sys.alpha2(1,:))*u(1:mi));
if strcmp(SimOptions.softConstraints, 'true')
    Sim.Jp.f2(z) = Epsilon'*Epsilon;
else
    Sim.Jp.f2(z) = (SimParam.x_k - SimParam.x_s)'.*(SimParam.x_k -
SimParam.x_s);
end
Sim.Jp.f3(z) = DeltaU(1:mi)'.*DeltaU(1:mi);
Sim.J(z) = SimParam.gamma.e*Sim.Jp.f1(z) + ...
    SimParam.gamma.x*Sim.Jp.f2(z) + ...
    SimParam.gamma.u*Sim.Jp.f3(z);
Sim.Xref(:, z) = SimParam.x_s;
SimParam.x_k = Sys.A*SimParam.x_k + Sys.B*SimParam.u_k + Sys.Bp*Sys.D(1:md);
Sim.X(:, z) = SimParam.x_k;
for i=1:SimParam.Hp
    Sys.D0(1+(i-1)*md:i*md) = Sys.d(i+z+1, :).';
end
DeltaD = Sys.D0 - Sys.D;
Sys.D = Sys.D0;
for i=1:SimParam.Hp
    Sys.umax(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umax1(i+z, :);
    Sys.umin(1+(i-1)*mi:i*mi)=Sys.umin1(i+z, :);
end
Umax=Sys.umax;
Umin=Sys.umin;
costo_eolica(z) = Sys.alpha1(1)*u(1);

```

```

costo_solar(z) = Sys.alpha1(2)*u(2);
electric_cost(z) = (Sys.alpha2(1,:)*diag((1-abs(Sys.E))))*u(1:mi);
total_cost(z) = (Sys.alpha1 +
(Sys.alpha2(1,:)*diag((1-abs(Sys.E)))))*u(1:mi);
Sys.alpha2(25,:) = Sys.alpha2(1,:);
Sys.alpha2 = Sys.alpha2(2:25,:);
[omega,h,phi,CT] = QPMatrices(Sys,SimParam,SimOptions,'variable');
b_L = sparse([-Inf*ones(length(omega),1) ; h]);
b_U = sparse([ omega ; h ]);
Sys.DD(z,:) = Sys.D';
end
close(yy)
save('workspace.mat');

```

Bibliografía

- [1] U.S. Energy Information Administration. (2011, March 20 2012) Annual Energy Review 2010. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf>
- [2] Energy Information Administration. (2011, February 27 2012) International Energy Outlook 2011. [Online]. Available: [http://www.eia.gov/FTP/forecasting/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/FTP/forecasting/0484(2011).pdf)
- [3] Smarth Texas Rethinking Energy. (2012, February 2012) Pathway to power. [Online]. Available: http://www.txuelectricdelivery.com/tech_reliable/pathwaytopower.aspx
- [4] European-Commission. (2006, March 21 2012) Vision and strategy for europe’s electricity networks of the future.
- [5] Oil & Gas Journal, “Oil & gas reserves news,” August 2012. [Online]. Available: <http://www.ogj.com/oil-exploration-and-development/reserves.html>
- [6] U.S. Department of Energy. (2010, March 23 2012) 2010 Renewable Energy Data Book. [Online]. Available: www.nrel.gov/analysis/pdfs/51680.pdf
- [7] P. Bajpai, S. Kumar, and N. Kishore, “Sizing optimization and analysis of a stand-alone wtg system using hybrid energy storage technologies,” in *Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD), 2010 Proceedings of the International Conference on*, june 2010, pp. 1 –6.
- [8] N. A. b. A. Razak, M. M. bin Othman, and I. Musirin, “Optimal sizing and operational strategy of hybrid renewable energy system using homer,” in *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International*, pp. 495–501.
- [9] R. Huang, S. Low, U. Topcu, K. Chandy, and C. Clarke, “Optimal design of hybrid energy system with pv/wind turbine/storage: A case study,” in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, oct. 2011, pp. 511 –516.
- [10] U. Sureshkumar, P. Manoharan, and A. Ramalakshmi, “Economic cost analysis of hybrid renewable energy system using homer,” in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on*, march 2012, pp. 94 –99.
- [11] A. Rohani, K. Mazlumi, and H. Kord, “Modeling of a hybrid power system for economic analysis and environmental impact in homer,” in *Electrical Engineering (ICEE), 2010 18th Iranian Conference on*, March 2012 2010, pp. 819 –823.

- [12] S. B. Silva, M. A. G. Oliveira, and M. M. Severino, "Sizing and optimization of hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 9, no. 1, pp. 817–822, 2011.
- [13] T. Tudorache, D. Kisk, B. Radulescu, and M. Popescu, "Design and implementation of an autonomous wind/pv/diesel/battery power system," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, may 2012, pp. 987–992.
- [14] N. Baharudin, T. Mansur, R. Ali, A. Wahab, N. Rahman, E. Ariff, and A. Ali, "Mini-grid power system optimization design and economic analysis of solar powered sea water desalination plant for rural communities and emergency relief conditions," in *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2012 IEEE International*, june 2012, pp. 465–469.
- [15] M. Castaneda, L. Fernandez, H. Sanchez, A. Cano, and F. Jurado, "Sizing methods for stand-alone hybrid systems based on renewable energies and hydrogen," in *Electrotechnical Conference (MELECON), 2012 16th IEEE Mediterranean*, march 2012, pp. 832–835.
- [16] M. B. Shadmand, M. Pasupuleti, and R. Balog, "Photovoltaic-wind hybrid system with battery back-up optimized for apartment complexes and other community living environments," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, pp. 3626–3632.
- [17] R. Baños and F. Manzano-Agugliaro and F.G. Montoya and C. Gil and A. Alcayde and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753 – 1766, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004430>
- [18] M. Fadaee and M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3364 – 3369, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112001669>
- [19] R. Belfkira, C. Nichita, P. Reghem, and G. Barakat, "Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, pp. 1834–1839.
- [20] O. Ekren and B. Y. Ekren, "Size optimization of a pv/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing," *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592 – 598, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002177>
- [21] H. V. Haghi, S. M. Hakimi, and S. M. M. Tafreshi, "Optimal sizing of a hybrid power system considering wind power uncertainty using pso-embedded stochastic simulation,"

- in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on*, pp. 722–727.
- [22] B. Zhang, Y. Yang, and L. Gan, “Dynamic control of wind/photovoltaic hybrid power systems based on an advanced particle swarm optimization,” in *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*, april 2008, pp. 1–6.
- [23] A. Hameed, M. Elhagri, A. Shaltout, and M. Aziz, “Optimum sizing of hybrid wt/pv systems via open-space particle swarm optimization,” in *Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), 2012 Second Iranian Conference on*, march 2012, pp. 55–60.
- [24] W. Lingfeng and S. Chanan, “Pso-based multi-criteria optimum design of a grid-connected hybrid power system with multiple renewable sources of energy,” in *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*, pp. 250–257.
- [25] J. Zeng, M. Li, J. F. Liu, J. Wu, and H. W. Ngan, “Operational optimization of a stand-alone hybrid renewable energy generation system based on an improved genetic algorithm,” in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–6.
- [26] Y. Katsigiannis, P. Georgilakis, and E. Karapidakis, “Hybrid simulated annealing-tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewables,” *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 330–338, july 2012.
- [27] M. Alsayed, M. Cacciato, G. Scelba, and A. Consoli, “Optimal sizing of hybrid power generation systems based on multi criteria decision analysis,” in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on*, june 2012, pp. 1442–1447.
- [28] X. Hu, K. Tseng, and M. Srinivasan, “Optimization of battery energy storage system with super-capacitor for renewable energy applications,” in *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, 30 2011-june 3 2011, pp. 1552–1557.
- [29] H. Farhangi, “The path of the smart grid,” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.
- [30] Energy Information Administration. (2010, March 20 2012) Country Analysis Briefs, China. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/EMEU/cabs/China/pdf.pdf>
- [31] H. Rudnick, L. Barroso, D. Llaens, D. Watts, and R. Ferreira, “Flexible connections: Solutions and challenges for the integration of renewables in south america,” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 2, pp. 24–36, 2012.
- [32] G. Arnold, “Challenges and opportunities in smart grid: A position article,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 922–927, 2011.

- [33] J. Zhenhua, L. Fangxing, Q. Wei, S. Hongbin, W. Hui, W. Jianhui, X. Yan, X. Zhao, and Z. Pei, "A vision of smart transmission grids," in *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, pp. 1–10.
- [34] F. Bouhafs, M. Mackay, and M. Merabti, "Links to the future: Communication requirements and challenges in the smart grid," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 24–32, 2012.
- [35] K. Moslehi and R. Kumar, "A reliability perspective of the smart grid," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, 2010.
- [36] Z. Sumic. (2011, April 19 2012) 2010 Hype Cycle for Smart Grid Technologies, Gartner. [Online]. Available: <http://my.gartner.com/portal/server.pt?open=512&objID=260&mode=2&PageID=3460702&docCode=213421&ref=docDisplay>
- [37] International Energy Agency. (2011) Technology roadmap: Smart grids. [Online]. Available: http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf
- [38] D. K. Owens, "Protecting the grid [in my view]," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 96–94, 2012.
- [39] S. M. Amin and A. M. Giacomoni, "Smart grid, safe grid," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 33–40, 2012.
- [40] E. Santacana, G. Rackliffe, T. Le, and F. Xiaoming, "Getting smart," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 2, pp. 41–48, 2010.
- [41] U.S. Department of Energy. (2012, February 2012) Smart grid system report, 2010. [Online]. Available: http://fossil.energy.gov/education/energylessons/coal/coal_history.html
- [42] U.S. Department of Energy. (2011, March 23 2012) A Brief History of Coal Use. [Online]. Available: http://fossil.energy.gov/education/energylessons/coal/coal_history.html
- [43] O. C. Kopp, "Coal," *Britanica Encyclopedia Online Academic Version*, March, 2012 2012. [Online]. Available: <http://0-www.britannica.com/millennium.itesm.mx/EBchecked/topic/122863/coal>
- [44] U.S. Energy Information Administration. (2011, March 23 2012) Annual energy review 2010. [Online]. Available: http://www.eia.gov/kids/energy.cfm?page=tl_coal
- [45] National Energy Technology Laboratory. (2010, March 23 2012) History of U.S. Coal Use. [Online]. Available: <http://www.netl.doe.gov/keyissues/historyofcoaluse.html>
- [46] World Coal Association. (2012, April 02 2012) Coal, Uses of Coal. [Online]. Available: <http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/>

- [47] Global Energy Statistical Yearbook 2011. (2010, April 02 2012) Coal and Lignite Production. [Online]. Available: <http://yearbook.enerdata.net/2010-energy-consumption-data.html#/coal-and-lignite-production-in-2010.html>
- [48] U.S. Energy Information Administration. (2011, March 23 2012) Country Analysis Briefs, India. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/EMEU/cabs/India/pdf.pdf>
- [49] U.S. Energy Information Administration. (2010, March 23 2012) Country Analysis Briefs, Russia. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/EMEU/cabs/Russia/pdf.pdf>
- [50] G. I. Atwater and J. P. J. Riva. (2012, March 29 2012) Natural Gas. [Online]. Available: <http://0-www.britannica.com.millennium.itesm.mx/EBchecked/topic/406163/natural-gas>
- [51] U.S. Department of Energy. (2012, April 08 2012) The history of Natural Gas. [Online]. Available: http://fossil.energy.gov/education/energylessons/gas/gas_history.html
- [52] Natural Gas Org. (2012, April 08 2012) History. [Online]. Available: <http://www.naturalgas.org/overview/history.asp>
- [53] G. I. Atwater and J. P. J. Riva. (2012, March 29 2012) Petroleum. [Online]. Available: <http://0-www.britannica.com.millennium.itesm.mx/EBchecked/topic/454269/petroleum>.
- [54] F. Habashi, "The first oil well in the world," Québec, Canada, 2000. [Online]. Available: http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/HIST/bulletin_open_access/v25-1/v25-1%20p64-66.pdf
- [55] R. McHenry, "The first oil well (150th anniversary of the birth of the oil industry)," August 26 2009. [Online]. Available: <http://www.britannica.com/blogs/2009/08/the-first-oil-well/>
- [56] U. Davé, "Edwin drake and the oil well drill pipe," Summer 2008. [Online]. Available: <http://www.pabook.libraries.psu.edu/palitmap/DrakeOilWell.html>
- [57] Energy Information Administration. (2011, November) World Energy Outlook 2011. [Online]. Available: http://biblioteca.mty.itesm.mx/mty/bds/salta_bd.php?col_id=oecd
- [58] British Petroleum, "Statistical of world energy 2012," June 2012. [Online]. Available: <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>
- [59] Nuclear Energy Institute, "Nuclear energy around de world," 2012, visited on 04/04/2012,. [Online]. Available: <http://www.nei.org/resourcesandstats/nuclear-statistics/worldstatistics/>
- [60] S. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216 –1226, aug 2001.

- [61] Y. Wong, L. Lai, S. Gao, and K. Chau, "Stationary and mobile battery energy storage systems for smart grids," in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, july 2011, pp. 1 –6.
- [62] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154 – 2171, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000305>
- [63] M. Whittingham, "History, evolution, and future status of energy storage," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1518 –1534, 13 2012.
- [64] X. Tan, Q. Li, and H. Wang, "Advances and trends of energy storage technology in microgrid," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 179 – 191, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512003754>
- [65] R. Pena-Alzola, R. Sebastian, J. Quesada, and A. Colmenar, "Review of flywheel based energy storage systems," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on*, may 2011, pp. 1 –6.
- [66] N. Garimella and N.-K. Nair, "Assessment of battery energy storage systems for small-scale renewable energy integration," in *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, jan. 2009, pp. 1 –6.
- [67] B. Roberts and C. Sandberg, "The role of energy storage in development of smart grids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1139 –1144, june 2011.
- [68] G. Coppez, S. Chowdhury, and S. Chowdhury, "The importance of energy storage in renewable power generation: A review," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, 31 2010-sept. 3 2010, pp. 1 –5.
- [69] D.D.Ruscio, "Model predictive control and optimization," Noruega, 2010.
- [70] J. M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, 1st ed. Essex, England: Prentice Hall, 2002.
- [71] L.Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, 1st ed. Melbourne,Australia: Springer, 2009.
- [72] H.-L. Tsai, "Insolation-oriented model of photovoltaic module using matlab/simulink," *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1318 – 1326, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1000160X>
- [73] Nasa. (2012, Septiembre) Atmospheric science data center. [Online]. Available: <http://eosweb.larc.nasa.gov/>

- [74] A. N. Celik, “Energy output estimation for small-scale wind power generators using weibull-representative wind data,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, no. 5, pp. 693 – 707, 2003. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610502004713>
- [75] X. Xiazhen, C. Yan, Z. Youfei, B. Xue, W. Ming, and L. Yan-an, “Observation and simulation of wind energy resource in jiangsu coastal area,” in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, march 2010, pp. 1 –4.
- [76] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. (2006, December) Manuales de Energías Renovables, Energía Eólica. [Online]. Available: http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Energia_Eolica.pdf
- [77] K. Rudion, A. Orths, Z. Styczynski, and K. Strunz, “Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of dg integration,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, 0-0 2006, p. 6 pp.
- [78] W. Zhou, H. Yang, and Z. Fang, “Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar-wind power generation system,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1413 – 1423, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148107002601>
- [79] IEA, NEA, OECD, “Projected costs of generating electricity,” International Energy Agency, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation Development, París, Tech. Rep. ISBN 978-92-64-08430-8, Jan. 2010.
- [80] IEA, “Energy Technology Essentials, Hydrogen Production and Distribution,” International Energy Agency, USA, Tech. Rep., Jan. 2007.

Vita

Jorge Luis Rosero Beltrán nació en Quero Ecuador, el 20 de febrero de 1983. Se graduó de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en Quito Ecuador, en el año 2008, donde trabajó como Instructor de Laboratorio en el Departamento de Automatización y Control Industrial. En el primer semestre del año 2012, realizó su estancia de investigación de postgrado en el Instituto de Robótica e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Catalunya en España. En diciembre del mismo año, obtiene su grado académico de Maestría en Ciencias con Especialidad en Automatización en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, en México. Sus áreas de investigación son los Algoritmos Avanzados de Optimización y Control, Redes Inteligentes de Energía o Smart Grids y los Sistemas Renovables Energías.

Dirección permanente: Av. Solanda Oe3-112 y José Barrera
Cdla. El Comercio
Telf: (+593) 22681321
Email: jorge83luis@gmail.com
Quito - Ecuador

La presente tesis fue tipografiada con L^AT_EX¹ por Jorge Luis Rosero Beltrán.

¹El paquete de macros, `ITESMtesis.sty`, utilizado en el formateo de esta tesis fue escrito por el Dr. Horacio Martínez Alfaro <hma@itesm.mx>, Profesor Asociado del Centro de Sistemas Inteligentes del INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY, Campus Monterrey.