

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**PROGRAMA DE GRADUADOS E  
INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TESIS**

## **ANÁLISIS DEL BALANCE LOCAL DE ENERGÍA CON GENERACIÓN RENOVABLE EN EL SECTOR ELÉCTRICO MEXICANO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:

**ÁNGEL GUZMÁN TORRES**

ASESOR:

**DR. MANUEL MADRIGAL MARTINEZ**

MORELIA, MICHOACÁN

OCTUBRE 2018

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	11
1.1.1. Sector eléctrico en México . . . . .	12
1.1.2. Generación renovable . . . . .	12
1.1.3. Balance local de energía . . . . .	13
1.2. Definición del problema . . . . .	14
1.3. Objetivos . . . . .	14
1.4. Justificación . . . . .	15
1.5. Resumen de capítulos . . . . .	15
<b>2. El sector eléctrico en México</b>	<b>17</b>
2.1. Introducción . . . . .	17
2.2. Panorama actual . . . . .	17
2.2.1. Prospectiva energética de México . . . . .	20
2.3. Generación distribuida . . . . .	21
2.3.1. Generación distribuida en México . . . . .	22
2.3.2. Aplicaciones de la generación distribuida . . . . .	22
2.4. Contraprestaciones a generadores exentos . . . . .	23
2.4.1. Medición neta de energía (Net metering) . . . . .	23
2.4.2. Facturación neta (Net billing) y venta total de energía . . . . .	25
2.4.2.1. El régimen de venta total de energía . . . . .	25
2.5. Abasto aislado y generación local . . . . .	26
2.5.1. Abasto aislado . . . . .	26
2.5.2. Generación local . . . . .	27
2.5.3. Disposiciones aplicables a las que se sujeta el abasto aislado . . . . .	27
2.5.4. Aspectos generales para el abasto aislado y generación local con interconexión al SEN . . . . .	27
2.5.5. Resumen de esquemas de generación . . . . .	29
2.6. Mercado eléctrico mayorista . . . . .	29
2.6.1. Participantes del mercado y tipos de mercados . . . . .	30
2.6.2. Tipos de mercados . . . . .	30
2.6.3. Precios marginales locales (PML's) . . . . .	32
2.7. Resumen . . . . .	33

<b>3. Sistemas de generación y almacenamiento</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción . . . . .	35
3.2. Sistemas hidroeléctricos . . . . .	35
3.2.1. Tipos de hidroeléctricas de acuerdo a su régimen de flujo . . . . .	36
3.2.2. Partes de una hidroeléctrica y clasificación de mini hidroeléctricas . . . . .	37
3.2.3. Esquemas conexión de una planta hidroeléctrica . . . . .	39
3.2.4. Turbinas hidráulicas . . . . .	40
3.2.5. Resumen de hidroeléctricas . . . . .	42
3.3. Sistemas solares fotovoltaico . . . . .	42
3.3.1. Radiación solar . . . . .	42
3.3.2. Construcción y funcionamiento . . . . .	44
3.3.3. Partes de un sistema solar fotovoltaico . . . . .	45
3.4. Sistema de almacenamiento de energía . . . . .	47
3.4.1. Tipos de almacenamiento de energía . . . . .	48
3.4.2. Baterías electroquímicas . . . . .	49
3.4.3. Partes de una batería . . . . .	49
3.5. Sistemas eólicos . . . . .	50
3.5.1. La energía eólica a través del tiempo . . . . .	51
3.5.2. Aerogeneradores: funcionamiento, tipos y constitución . . . . .	51
3.5.3. Variabilidad de la velocidad del viento . . . . .	52
3.5.4. Componentes de un aerogenerador . . . . .	53
3.6. Resumen . . . . .	54
<b>4. Modelado de sistemas</b>	<b>55</b>
4.1. Introducción . . . . .	55
4.2. Modelo de sistema hidroeléctrico . . . . .	55
4.2.1. Calculo del consumo y generación de una minihidroeléctrica por bombeo . . . . .	55
4.2.2. Llenado y vaciado del tanque de almacenamiento de agua . . . . .	57
4.2.3. Ejemplo de simulación . . . . .	61
4.3. Modelo de sistemas solares fotovoltaicos . . . . .	63
4.3.1. Factores que influyen en el rendimiento de un sistema fotovoltaico . . . . .	63
4.3.2. Calculo de paneles . . . . .	65
4.3.3. Ejemplos de simulación . . . . .	66
4.4. Modelado de baterías . . . . .	69
4.4.1. Estimación basada en la intensidad . . . . .	69
4.4.2. Carga de la batería . . . . .	71
4.4.3. Estimación de la tensión . . . . .	71
4.4.4. Ejemplo de simulación . . . . .	72
4.5. Modelado del sistema eólico . . . . .	73
4.5.1. Ley Betz . . . . .	74
4.5.2. Modelo del sistema eólico . . . . .	75
4.5.3. Ejemplo de simulación . . . . .	77
4.6. Resumen . . . . .	78

<b>5. Balance local de energía con generación renovable</b>	<b>80</b>
5.1. Introducción . . . . .	80
5.2. Caso 1 . . . . .	84
5.3. Caso 2 . . . . .	91
5.4. Caso 3 . . . . .	95
5.5. Caso 4 . . . . .	98
5.6. Análisis de resultados . . . . .	103
5.7. Resumen . . . . .	107
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>108</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	108
6.2. Recomendaciones para trabajos futuros . . . . .	109
6.2.1. Técnicas de optimización . . . . .	109

# Índice de figuras

2.1. Capacidad instalada por tipo de tecnología 2016 . . . . .	19
2.2. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología . . . . .	20
2.3. Requisitos de energía limpia . . . . .	21
2.4. Mercado eléctrico mayorista . . . . .	31
2.5. Promedio de PML's para la zona de carga de Morelia. . . . .	33
3.1. Esquema general de central hidroeléctrica por bombeo . . . . .	37
3.2. Conexión de una planta hidroeléctrica con soporte de la red de distribución . . . . .	39
3.3. Estructura de la conexión de minihidroeléctrica con la red con acumulador . . . . .	40
3.4. Tipos de radiaciones . . . . .	43
3.5. Corte transversal de celda solar fotovoltaica . . . . .	45
3.6. Sistemas aislados e interconectados . . . . .	46
3.7. Estructura de una batería . . . . .	50
3.8. Partes de un aerogenerador . . . . .	53
4.1. Diagrama de bloques para cálculo de energía generada por una minihidraulica . . . . .	56
4.2. Vaciado de tanque superior . . . . .	57
4.3. Modelo de vaciado del tanque en Simulink . . . . .	59
4.4. Comportamiento del nivel de liquido en el tanque . . . . .	60
4.5. Llenado del tanque superior . . . . .	60
4.6. Tiempo de llenado . . . . .	61
4.7. Gráfica de llenado . . . . .	61
4.8. Esquema del ejemplo hidroeléctrico . . . . .	62
4.9. Diagrama de bloques para hidroeléctrica por bombeo . . . . .	62
4.10. Valores típicos de radiación solar . . . . .	63
4.11. Influencia de la radiación en celdas solares . . . . .	64
4.12. Influencia de la temperatura en celdas solares . . . . .	65
4.13. Esquema de ejemplo de demanda . . . . .	66
4.14. Número de paneles solares . . . . .	67
4.15. Pronósticos de radiación solar . . . . .	67
4.16. Modelo de generación en Simulink . . . . .	68
4.17. Modelo del subsistema en Simulink . . . . .	68
4.18. Energía Generada . . . . .	69

4.19. Diagrama de bloque de la batería . . . . .	70
4.20. Diagrama de bloques dentro del subsistema Battery Model en Simulink . . . . .	70
4.21. Gráfica del resultado de la descarga de una batería SOC . . . . .	71
4.22. Modelo Equivalente de Thevenin . . . . .	72
4.23. Esquema para ejemplo de batería . . . . .	72
4.24. Gráfica de carga y descarga de batería . . . . .	73
4.25. Superficie barrida por las aspas . . . . .	74
4.26. Desviación del viento por un aerogenerador . . . . .	75
4.27. Diagrama de bloque que simula el funcionamiento del sistema eólico . . . . .	76
4.28. Subsistema del diagrama de bloques eólico . . . . .	76
4.29. Ejemplo de parque eólico . . . . .	77
4.30. Velocidad del viento pronosticada . . . . .	78
4.31. Energía generada por los aerogeneradores . . . . .	78
5.1. Esquema de generación local . . . . .	80
5.2. Gráficas de precios por energía . . . . .	81
5.3. Demanda del centro de carga . . . . .	84
5.4. Diagrama de bloques para el caso 1 . . . . .	85
5.5. Generación eólica y solar fotovoltaica . . . . .	87
5.6. Suma de la generación eólica y solar fotovoltaica . . . . .	87
5.7. Demanda contra generación caso 1 . . . . .	88
5.8. Compensación con baterías caso 1 . . . . .	88
5.9. Compensación con hidroeléctrica caso 1 . . . . .	89
5.10. Demanda contra todos los sistemas de generación_caso 1 . . . . .	89
5.11. Energía entregada y absorbida por la red_caso 1 . . . . .	90
5.12. Diagrama de bloques para el caso 2 . . . . .	92
5.13. Compensación con batería_caso 2 . . . . .	92
5.14. Compensación con la hidroeléctrica caso 2 . . . . .	93
5.15. Demanda contra la generación de todos sistemas_caso 2 . . . . .	93
5.16. Energía entregada y absorbida por la red_caso 2 . . . . .	94
5.17. Diagrama de bloques para el caso 3 . . . . .	95
5.18. Generación con la batería_caso 3 . . . . .	96
5.19. Generación con hidroeléctrica_caso 3 . . . . .	96
5.20. Generación y demanda vs demanda_caso 3 . . . . .	97
5.21. Inyección y retiro de la red_caso 3 . . . . .	97
5.22. Demanda del centro de carga_caso 4 . . . . .	99
5.23. Demanda vs generación_caso 4 . . . . .	100
5.24. Demanda vs batería_caso 4 . . . . .	100
5.25. Demanda vs hidroeléctrica_caso 4 . . . . .	101
5.26. Demanda vs todos los sistemas_caso 4 . . . . .	101
5.27. Retiros y entregas de energía a la red . . . . .	103

5.28. Propuesta de operación . . . . .	106
6.1. Esquemas de optimización . . . . .	110
6.2. Proceso de optimización . . . . .	112
6.3. Esquema 1 . . . . .	113
6.4. Esquema 2 . . . . .	114
6.5. Esquema 3 . . . . .	115
6.6. Esquema 4 . . . . .	116
6.7. Esquema 5 . . . . .	117
6.8. Rangos de operación eficiente de las turbinas . . . . .	121

# Índice de tablas

2.1. Capacidad instalada por tipo de tecnología . . . . .	18
2.2. Resumen de esquemas de generación . . . . .	29
2.3. Precios de energía en Nodos Distribuidos del MDA con fecha 11/05/2018 . . . . .	33
3.1. Clasificación de hidroeléctrica de acuerdo a su capacidad . . . . .	38
3.2. Tipo de centrales mini hidráulicas en México . . . . .	38
3.3. Eficiencia de turbinas . . . . .	41
3.4. Resumen de clasificaciones de hidroeléctricas . . . . .	42
3.5. Radiación solar en las capitales de los estados de México . . . . .	44
3.6. Tipos de tecnología de almacenamiento . . . . .	48
3.7. Escala de viento de Beaufort . . . . .	52
4.1. Valor estimado de potencia generada de una turbina Kaplan en (KW) . . . . .	57
4.2. Datos de entrada . . . . .	62
4.3. Datos de la batería . . . . .	72
4.4. Resultados del ejemplo de la batería . . . . .	73
5.1. Precios de PML's para el mes de marzo . . . . .	82
5.2. Cargos por periodo (Tarifa GDMTH) . . . . .	82
5.3. Horarios de periodos (Tarifa GDMTH) . . . . .	82
5.4. Horarios de periodos (Tarifa GDMTH) . . . . .	83
5.5. Cargo por capacidad en 2 distintos esquemas . . . . .	83
5.6. Parámetros de operación . . . . .	85
5.7. Datos del panel solar . . . . .	86
5.8. Datos del aerogenerador . . . . .	86
5.9. Datos de las baterías . . . . .	86
5.10. Datos de la hidroeléctrica por bombeo . . . . .	86
5.11. Resultados de balance de energía_caso 1 . . . . .	90
5.12. Demanda_caso 1 . . . . .	90
5.13. Cargos sin generación caso 1 . . . . .	91
5.14. Cargos con generación_caso 1 . . . . .	91
5.15. Demanda_caso2 . . . . .	94
5.16. Cargos con generación_caso 2 . . . . .	94
5.17. Demanda_caso 3 . . . . .	97



5.18. Cargos con generación_caso 3 . . . . .	98
5.19. Parámetros para el ejercicio 4 . . . . .	99
5.20. Datos del sistema hidroeléctrico por bombeo_caso 4 . . . . .	99
5.21. Resultados de energía_caso 4 . . . . .	102
5.22. Demanda_caso 4 . . . . .	102
5.23. Cargos sin generación_caso 4 . . . . .	102
5.24. Cargos con generación_caso 4 . . . . .	102
5.25. Modalidades de un centro de carga . . . . .	103
5.26. Modalidades de generador . . . . .	104
5.27. Características de los distintos esquemas de participación en el sector eléctrico . . . .	105

# Resumen

En este trabajo se trata acerca de los cambios que se han generado en el sector eléctrico en México, a partir de la reforma energética, explicando algunas de las nuevas oportunidades que trajo consigo para los usuarios finales y empresas privadas que buscan una participación en la industria eléctrica mexicana.

La tesis se enfoca en el análisis del esquema de generación local, el cual es una nueva forma de obtener el suministro eléctrico mediante la generación y consumo de energía dentro de una red privada. Este nuevo esquema ofrece diversos beneficios, principalmente para usuarios con grandes demandas cómo lo son los usuarios industriales, que ahora pueden cubrir su propia demanda de energía comprándola directamente a un generador privado.

Para el análisis se presenta casos de estudio, dónde sistemas de generación renovable respaldados con sistemas de almacenamiento tratan de satisfacer la demanda de energía de un centro de carga a lo largo de un día, esto bajo un esquema de generación local con interconexión a la red. En el estudio se toman en cuenta los retiros e inyecciones de energía a la red, con la finalidad de observar las repercusiones en la facturación eléctrica. .

La tesis muestra también la forma en la que afecta un mal dimensionamiento y una inadecuada operación de una central eléctrica que suministra energía a centros de carga dentro una red privada bajo el esquema de generación local. Y busca mostrar algunas estrategias de despacho de los sistemas de almacenamiento de acuerdo a la manera en que se comporta el mercado y el costo de las tarifas en diferentes periodos horarios.

# Abstract

This thesis talks about the changes that have been generated in the electricity sector in Mexico, from the energy reform, explaining some of the new opportunities that it brought with it for end users and private companies that seek participation in the activities of the Mexican electricity industry.

The thesis focuses on the analysis of the local generation scheme, which is a new way of obtaining electricity through the generation and consumption of energy within a private network. This new scheme offers several benefits, mainly for users with high demands, as are industrial users, who can now cover their own energy demand by purchasing it directly from a private generator.

For the thesis, case studies are presented, where renewable generation systems supported by storage systems try to meet the energy demand of a load center over a day, under a local generation scheme with interconnection to the network. The study takes into account the withdrawals and injections of energy into the network, in order to see the economic impact in the electricity bills.

The thesis also shows the way in which bad sizing affects and inadequate operation of a power plant that supplies power to load centers within a private network under the local generation scheme. And it looks for to show some strategies of dispatch of the storage systems according to the way in which the market behaves and the cost of the tariffs in different time periods.