



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE QUÍMICA
ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL

**“PRONÓSTICO DE LA ENERGÍA GENERADA EN UN PARQUE
EÓLICO USANDO CADENAS DE MARKOV”**

TRABAJO ESCRITO PROFESIONAL
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL

PRESENTA:
ING. ALEJANDRA SÁNCHEZ SOLÍS

TUTOR:
MTRO. ARTURO VALLES TERRAZAS
FACULTAD DE QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, ABRIL 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE Profesor: Francisco Jerónimo Nieto Colín

VOCAL Profesor: Raúl Valdivieso Martínez

SECRETARIO Profesor: Arturo Valles Terrazas

1er. SUPLENTE Profesor: Marcos Enríquez Rodríguez

2° SUPLENTE Profesor: Luis Miguel Muñoz Hernández

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO "D", FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, COYOACÁN 04510,
CIUDAD DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA:

Mtro. Ing. Arturo Valles Terrazas

SUSTENTANTE

Ing. Alejandra Sánchez Solís

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por permitirme concluir una etapa más y tan importante en mi vida

A mis padres, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, sin ustedes no hubiera sido posible esto.

A mi director de tesis, Mtro. Ing. Arturo Valles Terrazas, quien aceptó dirigir esta tesis y confió en mí. Gracias por todos los aprendizajes a lo largo de esta aventura.

También de manera muy especial agradezco a mis sinodales, Ing. Francisco Nieto Colín, Dr. Raúl Valdívieso Martínez, Mtro. Luis Miguel Muñoz Hernández y al Ing. Marcos Enríquez Rodríguez, por sus valiosas observaciones en este trabajo.

Al Dr. Ángel Enrique Chávez Castellanos, quien representa una pieza fundamental en mi formación académica y de quien aprendí lo que es la tenacidad y el valor.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, porque una vez más, me albergó en su seno y me forjó en sus aulas. Sólo puedo expresar mi gratitud, por tener la sangre azul y la piel dorada.

A mis amigos Mahikari Tai, por todo su invaluable apoyo y estar siempre al pendiente de mí y de mi familia.

	Pág.
Índice general	1
1. Introducción	3
1.1 ¿Qué es una decisión?	3
1.2 ¿Cómo se lleva a cabo un proceso de decisión?	3
1.3 Clasificación de las decisiones	4
1.4 Ambientes de decisión	5
1.5 Energías renovables: definición	6
1.6 Energía eólica	7
1.7 Contexto internacional	9
1.8 México como productor de energía eólica	11
1.9 Ventajas y desventajas de los parques eólicos	13
1.10 Marco Regulatorio	14
1.11 Objetivos	19
2. Planteamiento del problema	20
3. Marco Teórico	24
3.1 Sistemas y ambiente de un sistema	24
3.2 Componentes de un sistema	24
3.3 Clasificación de los sistemas	24
3.4 Modelo de un sistema	25
3.5 Tipos de modelos	25
3.6 Procesos estocásticos	26
3.7 Cadenas de Markov	27
3.8 Clasificación de estados en Cadenas de Markov	28
3.9 Clasificación de los procesos de Markov según la naturaleza	29

discreta o continua de las variables

4. Resultados y análisis	31
5. Conclusiones	40
6. Bibliografía	41

1. Introducción

1.1 ¿Qué es una decisión?

Una decisión es una determinación o una resolución que se toma o se da de una cosa dudosa¹. Firmeza de carácter. Acción de decidir. Disposición con carácter de ley.

Para extender el significado de la palabra, consulto un diccionario de filosofía en el cual se comenta que en la antigüedad, Aristóteles y los escolásticos a este término lo denominaban elección, o sea, al momento final de la deliberación, en el cual se determina el compromiso hacia una de las alternativas posibles. Aristóteles definió la elección como una “apetencia deliberada que concierne a las cosas que dependen de nosotros”.

Para los filósofos, una decisión es entendida como el acto de separar las posibilidades del compromiso con una de las alternativas posibles. Por lo tanto, es un acto anticipatorio, que se proyecta y por el cual el futuro se determina de alguna manera.²

1.2 ¿Cómo se lleva a cabo un proceso de decisión?

Un proceso de toma de decisiones puede tener las siguientes etapas:

1. Identificar y analizar el problema. Encontrar el problema y reconocer que se debe tomar una decisión para llegar a la solución de éste.
2. Identificar los criterios de decisión y ponderarlos. Aquellos aspectos que son relevantes al momento de tomar la decisión, es decir aquellas pautas de las cuales depende la decisión que se tome.
3. Definir la prioridad para atender el problema. La definición de la prioridad se basa en el impacto y en la urgencia que se tiene para atender y resolver el problema.
4. Generar las alternativas de solución. Consiste en desarrollar distintas posibles soluciones al problema. Cuántas más alternativas se tengan va a ser más probable encontrar una que resulte más satisfactoria. Técnicas tales como la lluvia de ideas, las relaciones forzadas, la sinéctica, etc. Son necesarias en esta etapa en la cual es importante la creatividad.

¹Diccionario de la www.rae.es . Consultado en diciembre, 2014.

² Abbagnano, N. Diccionario de filosofía. Fondo de Cultura Económica: México, 1960.

5. Evaluar las alternativas. Es un estudio detallado de cada una de las soluciones, analizar sus ventajas y desventajas, de forma individual con respecto a los criterios de decisión.
6. Elección de la mejor alternativa. Se escoge la alternativa que según la evaluación va a obtener mejores resultados para el problema.
7. Aplicación de la decisión. Poner en marcha la decisión tomada para así poder evaluar si la decisión fue acertada o no. La implementación probablemente derive en la toma de nuevas decisiones, de menor importancia.
8. Evaluación de los resultados. Después de poner en marcha la decisión es necesario evaluar si se solucionó o no el problema, es decir, si la decisión tomada fue acertada, en caso contrario, se tiene que volver a repetir el proceso de decisión.³

1.3 Clasificación de las decisiones

Todas las decisiones no son iguales ni producen las mismas consecuencias, ni tampoco su adopción es de idéntica relevancia, es por ello que existen distintos tipos de decisiones. Existen varias propuestas para su clasificación pero destacaré las más representativas.

Tipología por niveles

Esta clasificación está conectada con el concepto de estructura organizativa y la idea de jerarquía que se deriva de la misma. Las decisiones se clasifican en función de la posición jerárquica o nivel administrativo ocupado por el decisor. Desde este planteamiento distinguiremos:

- a) *Decisiones estratégicas*. Son decisiones adoptadas por decisores situados en el ápice de la pirámide jerárquica o altos directivos. Estas decisiones se refieren principalmente a las relaciones entre la organización, empresa o su entorno. Son decisiones de gran trascendencia puesto que definen los fines y objetivos generales que afectan a la totalidad de la organización; a su vez perfilan los planes a largo plazo para lograr esos objetivos. Son decisiones a largo plazo y no repetitivas, por lo que la información es escasa y sus efectos son difícilmente reversibles; los errores en este tipo de decisiones pueden comprometer el desarrollo de la empresa y en determinados casos su supervivencia, por lo tanto requieren un alto grado de reflexión y juicio.
- b) *Decisiones tácticas*. Son decisiones tomadas por directivos intermedios. Tratan de asignar eficientemente los recursos disponibles para alcanzar los objetivos fijados a nivel estratégico. Estas decisiones pueden ser repetitivas

³ www.emprendepyme.net Consultada en marzo, 2015.

y el grado de repetición es suficiente para confiar en precedentes. Sus consecuencias suelen producirse en un horizonte medio y son generalmente reversibles. Un ejemplo son las decisiones relacionadas con la disposición de la planta, la distribución del presupuesto o la planificación de la producción.

- c) Decisiones operativas. Adoptadas por personal operativo que se sitúan en el nivel más inferior. Son las relacionadas con las actividades corrientes de la empresa. El grado de repetitividad es elevado: se traducen a menudo en rutinas y procedimientos automáticos, por lo que la información necesaria es fácilmente disponible. Los errores se corrigen rápidamente ya que el plazo al que afecta es corto y las sanciones son mínimas.

1.4 Ambientes de decisión

Se consideran que hay cinco elementos básicos en una decisión.

Estrategias: son los cursos de acción o planes condicionales compuestos por variables controlables.

Estados de la naturaleza: son los eventos de los que depende la decisión y en los que no puede influir apenas el decisor.

Resultados: son aquellos que tienen lugar al emplear una estrategia específica, dado un estado de la naturaleza concreto.

Predicciones de probabilidad: estimado de la posibilidad de que ocurre un evento u otro.

Criterio de decisión: que muestra el modo de utilizar la información anterior para seleccionar el plan a seguir

La toma de decisiones resulta más sencilla cuanto mayor es la información de la que se dispone. El nivel de información determina el tipo de ambiente de la decisión.

1. *Certeza.* El ambiente de certeza es aquél en el que el decisor conoce con absoluta seguridad los estados de la naturaleza que van a presentarse.
2. *Riesgo.* Es aquél en el que el decisor sabe qué estados de la naturaleza se pueden presentar y la probabilidad que tiene cada uno de ellos de presentarse.
3. *Incertidumbre estructurada.* Es aquél donde se conocen los estados de la naturaleza, pero no la probabilidad de cada uno de ellos.
4. *Incertidumbre no estructurada.* Es aquél donde ni siquiera se conocen los estados de la naturaleza.

1.5 Energías renovables: definición

Energía renovable se define como la contribución total del suministro de energía primario, esto incluye la hidráulica, geotérmica, solar, eólica. La energía derivada de biocombustibles sólidos, biogasolina, biodiesels y otros biocombustibles líquidos y gases, así como desperdicios municipales también se consideran fuentes de energía renovables. Los biocombustibles son combustibles obtenidos de organismos vivos, esto incluye madera, desperdicios vegetales (desechos de madera y cultivos usados para la producción de energía), etanol, leñías de sulfito. Los desperdicios municipales comprenden los desechos provenientes de residencias, comercio y los derivados del sector de servicios públicos, los cuales son recolectados por las autoridades para disposición en un centro de almacenaje para su posterior utilización en la producción de energía. Esto se mide en miles de pies o su equivalente en toneladas de crudo.⁴

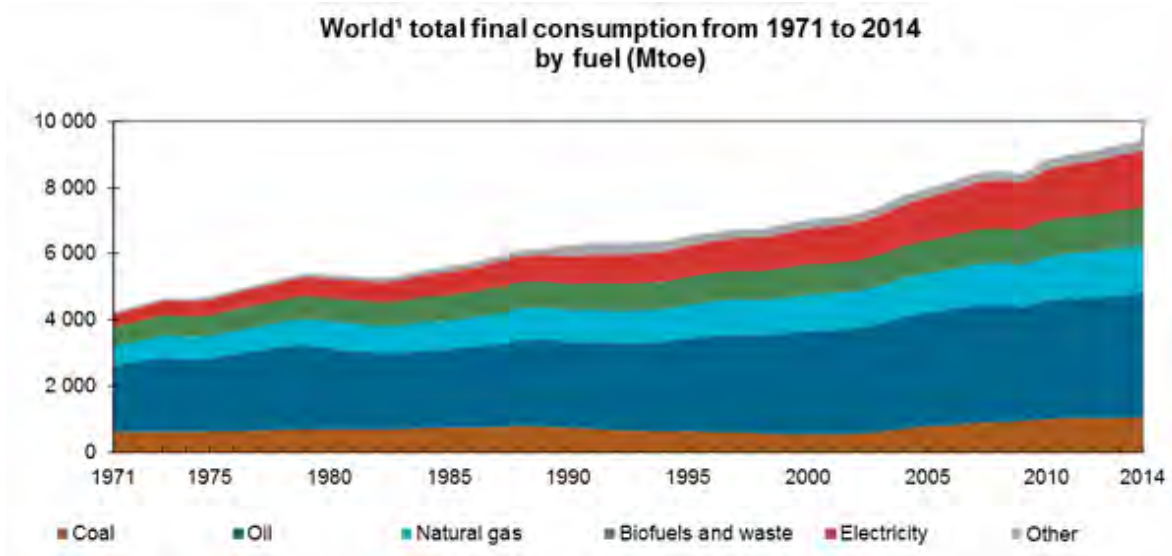
En la siguiente gráfica se muestra una gráfica de la participación que tiene cada país en materia de uso de energías renovables, en un período comprendido entre 2010 y 2015.

En la actualidad, la electricidad está jugando un papel muy importante en nuestras vidas, considerando a China el productor número uno de electricidad a nivel global, produciendo un cuarto de la electricidad a nivel global. En las últimas décadas, el uso de la electricidad se ha intensificado de un 10 a un 20%, debido al desarrollo urbano y tecnológico que se ha dado a escala mundial, su uso en residencias, oficinas, calles, servicios y diversos dispositivos electrónicos.

En la siguiente gráfica se muestra el consumo mundial de diferentes fuentes de energía.

⁴ data.oecd.org/energy/renewable-energy.htm consultado en septiembre 2016.

Gráfica1. Consumo mundial total por combustibles



Fuente: OECD, 2016.

China es también el productor de carbón más importante del mundo, mientras que Estados Unidos permanece en su posición como el productor número uno de gas y en 2015 fue el segundo productor de crudo, detrás de Arabia Saudita y por encima de Rusia.

En la gráfica 1 se muestra que la energía más usada a escala global es el petróleo y sus derivados como el gas natural, seguido de la electricidad.

1.6 Energía eólica

Le energía eólica es la energía obtenida del viento. Es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y es hasta el día de hoy la energía más eficiente de todas las energías renovables. El término “eólico” proviene del latín *aeolicus*, perteneciente o relativo a Eolo, Dios del viento en la mitología griega.

La energía eólica consiste en convertir la energía que produce el movimiento de las palas de un aerogenerador impulsadas por el viento en energía eléctrica.⁵

Ante los efectos negativos del cambio climático global y la llegada de la máxima producción mundial de petróleo convencional, la generación de energía eólica se presenta como la energía renovable más vendida en el ámbito internacional por

⁵ www.acciona.com/es consultada septiembre, 2016.

potencia instalada (MW) y por energía generada, al ser una medida óptima para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); reemplazar los usos energéticos de los combustibles fósiles, en particular del petróleo; crear empleos verdes; suministrar energía eléctrica a comunidades rurales y marginadas y garantizar la seguridad energética de los países ante la volatilidad de los precios del petróleo. De esta manera, la energía eólica ha sido la energía renovable de mayor crecimiento mundial en términos de capacidad eléctrica instalada, con 194.4 GW acumulados en 2010, y cerca de 62% de la inversión global en energías renovables durante el mismo año.

Es importante destacar que hay dos factores fundamentales para determinar la viabilidad de un parque eólico: el aprovechamiento y emplazamiento, y los costos totales de una planta eólica.

El aprovechamiento de la energía eólica depende de la orografía y de la velocidad y dirección del viento, y para que la energía eólica se establezca en una localización concreta, el lugar de instalación debe cumplir con dos requisitos principales:

1. Evaluar el terreno
2. Medición del viento

Los requisitos fundamentales para un emplazamiento son:

1. Más de 2000 horas de producción eólica equivalente a potencia máxima (horas equivalentes).
2. Respeto a la avifauna del entorno, evitando si es preciso el paso para aves migratorias entre grupos de aerogeneradores.
3. Lejanía de más de un kilómetro de núcleos urbanos para evitar la contaminación acústica de los parques eólicos.
4. La energía eólica debe estar instalada en suelo no urbanizable, generalmente.
5. No debe existir interferencia con señales electromagnéticas del entorno, ya que las señales de televisión, radio o telefonía se pueden ver perjudicadas si no se instalan dispositivos que lo eviten.

En la siguiente tabla se pueden observar los principales componentes del costo de una típica turbina de 2 MW instalada en Europa y su porcentaje de participación sobre el total.

Tabla 1. Estructura de costos de una turbina aerogeneradora de 2 MW instalada en Europa

	(€ 1000/ MW)	Participación en el costo total %
Turbina	928	75.6
Conexión a la red	109	8.9
Bases	80	6.5
Renta de la tierra	48	3.9
Instalación eléctrica	18	1.5
Consultoría	15	1.2
Gastos financieros	15	1.2
Construcción de carreteras	11	0.9
Sistemas de control	4	0.3
Total	1227	100

Fuente: The European Wind Energy Association, The Economics of Wind Energy, Marzo 2009.

El costo por kW instalado de capacidad eólica difiere entre países, por ejemplo, en Dinamarca los costos son los más bajos de todos los países europeos, para el Reino Unido, España y Alemania son de 20 a 30% mayores que en Dinamarca. Dado que las turbinas instaladas en México al día de hoy son fabricadas en Europa, principalmente por empresas españolas, consideremos estos parámetros aplicables para este país.

1.7 Contexto internacional

Actualmente cerca de 83 países desarrollan la energía eólica a escala comercial, aunque sólo un grupo reducido concentra el mercado de la energía eólica. En términos de capacidad eólica instalada ésta se encuentra distribuida de la siguiente manera:

Tabla 2. Energía eólica por país

País	Capacidad instalada (MW)	%
China	30, 753	48.5
E.U.	8,598	13.5
Alemania	6,013	9.5
Brasil	2,754	4.3
India	2,623	4.1
Canadá	1,506	2.4
Polonia	1,266	2.0
Francia	1,073	1.7
Reino Unido	975	1.5
Turquía	956	1.5
Resto del mundo	6,950	11.0
Top 10 países	56,517	89
Total mundial	63,467	100

Fuente: Global Wind Energy Council, 2016.

En América Latina, Brasil es el país más avanzado en materia eólica con un potencial máximo de 8,715 MW seguido de México con una capacidad instalada de 3,073 MW, seguidos de Chile con 933 MW, Uruguay, Argentina, Panamá y Costa Rica, cuyos datos se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 3. Capacidad de generación de energía eólica “países latinoamericanos”

País	Capacidad instalada (MW)
Brasil	8,715
México	3,073
Chile	933
Uruguay	845
Argentina	279
Panamá	270
Costa Rica	268

Fuente: Global Wind Energy Council, 2016.

En la Asamblea General de la ONU del año 2011 se lanzó la iniciativa Energía Sustentable para Todos o *Sustainable Energy for All* (SE4ALL), propuesta por el Secretario General de dicho organismo. El objetivo principal de la iniciativa es transformar las condiciones de desarrollo mediante tres objetivos globales que deberán cumplirse en 2030: proveer acceso a energía para toda la población, duplicar la participación de energía proveniente de fuentes renovables dentro de la matriz energética, e incrementar la tasa global de crecimiento de eficiencia energética.

Para incrementar el “acceso universal de energía moderna” se debe atender el acceso a electricidad, así como el acceso a fuentes diferentes a la leña y otras fuentes sólidas de energía para cocción y provisión de calor a los hogares.

1.8 México como productor de energía eólica

México cuenta con uno de los potenciales más altos en generación de energía eólica, esto lo perfila como un importante productor de esta energía con un crecimiento de 1400 MW al cierre de 2012, lo que equivale a la energía que requiere una ciudad como Puebla, y se prevé que para 2020 alcance los 12 000 MW. De acuerdo con el *National Renewable Energy Laboratory* de Estados Unidos, se estima que el potencial de México para el caso de la energía eólica es superior a los 40 000 MW.

En particular la región del istmo de Tehuantepec presenta velocidades de viento ideales para este tipo de generación con uno de los mayores potenciales de generación de energía eólica en todo el mundo, calculado entre 5000 y 7000 MW de capacidad anual, suficiente para abastecer a 18 millones de habitantes del medio urbano.

El enorme potencial del istmo de Tehuantepec presenta velocidades de viento, que excede los 1200 watts por metro cuadrado (W/m^2) entre los meses de octubre y febrero con una velocidad de viento de 8 m/s a 50 metros por arriba del suelo y a la presencia de crestas y cordilleras con elevaciones de terreno de 500 a 1000 metros sobre todo en las zonas de la La Mata, La Venta y La Ventosa.

En este sitio, en particular en los municipios de Juchitán de Zaragoza, El Espinal, San Dionisio del Mar, Asunción Ixtaltepec, Unión Hidalgo, Santo Domingo Ingenio, entre otras, empresas trasnacionales y con el apoyo del gobierno mexicano e instituciones financieras internacionales, desarrollan los parques eólicos terrestres a gran escala que integran el Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec, con los argumentos de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, generar energía limpia y promover el desarrollo económico de Oaxaca.

México, país rico en petróleo durante mucho tiempo, no estaba muy convencido del desarrollo de energías renovables. Sin embargo, en los últimos años han sido varios los grandes proyectos puestos en marcha en parte gracias a la promulgación de dos importantes leyes sobre eficiencia energética y energías renovables. México puede presumir haber puesto en marcha Eurus, el mayor parque eólico de toda América Latina, desarrollado por la empresa española Acciona Energía. Según, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) hasta el año 2016, se cuentan con los siguientes proyectos aprobados y en funcionamiento con las siguientes capacidades instaladas.

Tabla 3. Centrales generadoras en operación hasta Mayo 2016.

Central Generadora	Entidad Federativa	Tipo de generación	Capacidad instalada (MW)
C.E. Guerrero Negro	Baja California Sur	Eoloeléctrica	0,600
C.E. Yuumil'ik	Quintana Roo	Eoloeléctrica	1,500
C.E. La Venta	Oaxaca	Eoloeléctrica	84,200
C.E. Oaxaca I	Oaxaca	Eoloeléctrica	102,000
C.E. Oaxaca II	Oaxaca	Eoloeléctrica	102,000
C.E. Oaxaca III	Oaxaca	Eoloeléctrica	102,000
C.E. Oaxaca IV	Oaxaca	Eoloeléctrica	102,000
		TOTAL	494,300

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2016.

1.9 Ventajas y desventajas de los parques eólicos

Las ventajas más evidentes que resultan en la instalación de los parques eólicos es la reducción en el uso de los combustibles fósiles, el tiempo de construcción es menor con respecto a otras opciones energéticas y también se cobran impuestos que serán retribuidos a la zona en donde se instala el parque eólico.

Los aspectos desfavorables de los parques eólicos es que muchas aves migratorias corren peligro de morir en las aspas de los generadores, provocando un daño ambiental en cadena,⁶ además de la contaminación de suelos y aguas, como mantos, ríos y lagunas por el derrame y cambio de miles de litros de aceites lubricantes de las turbinas, cuyo destino al ser cambiados no se especifica en el Manifiesto del Impacto Ambiental de los proyectos.

También existe un daño considerable a los habitantes de las comunidades próximas a los parques industriales eólicos, debido al incremento considerables en los niveles de ruido electromagnético provocado por decenas de aerogeneradores trabajando a la vez, esto aunado a la poca remuneración ofrecida por las empresas por la

⁶ Henestroza, R. "Desarrollo del Proyecto eólico en la región del Istmo de Tehuantepec". Investigación y Ciencia, Núm. 42, septiembre-diciembre, 2008, pp. 18-21. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

reserva territorial antes del montaje y operación, así como el pago por arrendamiento de las tierras con torres asignadas y/o involucradas, por veinte años, los montos son de diez o veinte veces menores a lo que las mismas transnacionales ofrecen en Europa o Estados Unidos.

Lo impactos de los parques eólicos en términos generales serían en primer lugar el conflicto por la tierra, generalmente encabezado por los grupos o asambleas de gente nativa de esos lugares que muestran fehacientemente su rechazo a la construcción de los parques eólicos, los cuales se inconforman con el cambio de tenencia de la tierra colectiva a privada a través de la firma de contratos de arrendamiento de tierras entre sus propietarios y las empresas eólicas, que permite a éstas acceder a la tierra para instalar aerogeneradores que aprovechen el recurso eólico. Estos contratos se realizan en condiciones de clara desventaja para los propietarios porque permiten a las empresas obtener derechos sobre el uso de la tierra durante 30 años, y apropiarse de gran parte de las ganancias generadas por los parques eólicos al fijar los montos por el pago de la renta de cada hectárea arrendada. Los opositores a los parques eólicos han manifestado que los contratos usualmente no ofrecen información transparente y veraz sobre los derechos que tienen los propietarios al arrendar su tierra, y sobre lo que sucederá con las instalaciones eólicas una vez que se termine el contrato.

1.10 Marco Regulatorio

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos contiene en sus artículos 4, 27 y 28, varios preceptos en los que el uso y aprovechamiento de las energías renovables y no renovables se sustentan, como el derecho a un medio ambiente adecuado (artículo 4°); así como la rectoría que le corresponde al Estado del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable. También, el derecho que se otorga a la Nación de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación (artículo 27), con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana; y la necesidad que se establece de asegurar la eficacia de la prestación de los servicios y la utilización social de los bienes.⁷

El Servicio Público de Energía Eléctrica se entiende como la realización de obras e instalaciones y trabajos que precisen la planeación, ejecución, operación y mantenimiento del sistema eléctrico nacional, siempre y cuando dichas actividades se encuentren dirigidas a la prestación del servicio de energía eléctrica de la población, empresas y entidades públicas y privadas en general, y están encomendadas enteramente a la Comisión Federal de Electricidad.

⁷ “Prospectiva de energías renovables 2013-2017”. Secretaría de Energía, 2013.

En diciembre de 1992, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, (LSPEE) fue modificada para permitir la participación privada en las actividades de generación de energía eléctrica. El artículo 3 de esta ley enumera seis actividades que no están consideradas como servicio público, entre las que se encuentra el autoabastecimiento, cogeneración, producción independiente, pequeña producción, importación y exportación de energía eléctrica. En 2008, con la publicación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento a la Transición Energética (LAERFTE) se establecieron reglas específicas para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y mediante procesos de cogeneración eficiente. La Comisión Reguladora de Energía (CRE), está encargada de promover el desarrollo eficiente mediante la regulación de la generación, exportación e importación de energía eléctrica que realicen los particulares en México (artículo 2, fracción II Ley de la CRE).

A partir de las atribuciones conferidas por la LAERFTE, la CRE desarrolló e implantó una regulación específica para fuentes renovables de energía y publicó convenios y modelos de contratos para regular la generación de energía según la capacidad, de acuerdo a los cuales los proyectos de menos de 500kW no requieren permisos de la CRE, aunque sí el cumplimiento de la normatividad técnica emitida por CFE, a partir de metodologías emitidas por la CRE.

La siguiente tabla describe de manera desagregada el conjunto de trámites que son necesarios para que una nueva empresa desarrolle un proyecto y genere energía eléctrica con interconexión a la red, de acuerdo con la modalidad que corresponda. El conjunto de trámites descrito puede segmentarse en aquellos que se refieren a la constitución, evaluación, aprobaciones y permisos, y contrataciones, así como a la celebración de los convenios y contratos específicos.

Tabla 4. Trámites requeridos en el desarrollo de proyectos de generación eléctrica de más de 500 kW

	<p>Constitución empresarial</p> <ul style="list-style-type: none"> -Escrituración, registro de sociedad, registros fiscales y altas empresariales -Constitución de sociedad de autoabastecimiento
CONSTITUCIÓN Y EVALUACIÓN	<p>Evaluación de Viabilidad Ambiental y Arqueológica</p> <ul style="list-style-type: none"> -Manifestación de Impacto Ambiental-SEMARNAT -Registro de generación de residuos-SEMARNAT -Consulta de Zona Arqueológica-INAH <p>Evaluación de Viabilidad de Proyecto Eléctrico-CFE</p> <ul style="list-style-type: none"> -Estudio de prefactibilidad de interconexión -Estudio Porteo
APLIACIONES Y PERMISOS	<p>Uso de suelo-SEMARNAT</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cambio de uso de suelo forestal -Licencia Ambiental Única -Licencia de funcionamiento -Trámite Unificado de Suelo <p>Generación de energía-CRE</p> <ul style="list-style-type: none"> -Generación de electricidad en producción independiente. -Generación de electricidad en pequeña producción. -Generación de electricidad para autoabastecimiento -Generación de electricidad en cogeneración <p>Instalaciones eléctricas-CFE</p> <ul style="list-style-type: none"> -Proyecto de ingeniería básica -Solicitud de servicios de transmisión <p>Contratos y convenios con CFE</p> <ul style="list-style-type: none"> -Contrato de interconexión -Contrato de respaldo -Convenio de transmisión -Convenio de compraventa de excedentes de energía -Convenio de construcción <p>Otras contrataciones y trámites</p> <ul style="list-style-type: none"> -Contrataciones y Licencias Estatales y Municipales

Fuente: SENER, 2013

Marco de políticas

México ha tomado distintas medidas para fomentar las energías renovables, con la finalidad de diversificar las fuentes de generación como una forma de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático y contribuir a la seguridad energética del país.

La legislación más específica se concentra en la LAERFTE y la Ley General de Cambio Climático (LGCC). Estas dos leyes definen metas, la primera respecto a los límites de generación fósil en 2024 (65%) en 2035 (60%) y 2050 (50%), y la segunda respecto a la participación de tecnologías de generación limpia de energía, 35% en 2024. Estas metas orientan las políticas de promoción de energías renovables, con la intención de cumplir en tiempo los requerimientos de estas Leyes.

Para el cumplimiento de estas metas, de manera adicional a los instrumentos regulatorios, el gobierno tiene a su disposición otros mecanismos y medios para fomentar el aprovechamiento de energías renovables, entre los que se incluyen instrumentos económicos, de información, de fomento a la investigación y el desarrollo tecnológico de planeación.

Instrumentos económicos:

Estos instrumentos se agrupan en incentivos a la generación, mecanismos complementarios y de nivelación de costos. Dentro de cada uno de estos grupos se identifica un conjunto de políticas específicas, la mayoría de las cuales se implementan en México. La lista que se presenta a continuación incluyen, subastas, obligaciones de generación, incentivos en la contraprestación, bono en la contraprestación, mecanismos fiscales, prioridad en el despacho, mecanismos de interconexión, incorporación de externalidades y fortalecimiento de las cadenas de valor, sólo los incentivos y bonos a la contraprestación no son utilizados en México.

Subastas de pequeña producción: las subastas tienen el propósito de asegurar un precio fijo o un mecanismo cierto que permita garantizar al generador un ingreso hacia el futuro. De acuerdo con los lineamientos para licitaciones tipo subasta relativas a proyectos de pequeña producción de energía eléctrica a partir de energías renovables se debe de realizar procesos de compra de energía denominados “Licitaciones tipo subasta”, de acuerdo con los términos de lo previsto. Estos proyectos tienen un límite de capacidad de hasta 30MW, y su implementación

por parte de CFE están sujetos a términos definidos por la Secretaría de Energía y por la CRE que permitan asegurar un pago a largo plazo para el generador y un beneficio económico para el sector eléctrico con base en la inclusión de dichas subastas en el proceso de planeación del sector eléctrico.

Metas de generación de corto plazo (Incentivo a la generación). De conformidad con el artículo 11 de la LAERFTE, la SENER deberá establecer objetivos y metas específicas para el aprovechamiento de las energías renovables, las cuales deberán aumentar gradualmente sobre bases de viabilidad económica y del potencial técnico existente. Dichas metas deberán ser actualizadas y reportadas semestralmente, y se expresan en términos de porcentajes mínimos de capacidad instalada y porcentajes mínimos de suministro eléctrico, e incluirán metas para el suministrador (CFE) y los generadores (permisionarios).

Depreciación acelerada de activos fijos. La depreciación acelerada para inversiones en energías renovables, establecida en 2005, que permite depreciar el 100% de las inversiones “para maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables” (Ley del Impuesto sobre la Renta, artículo 40, fracción XII). La depreciación sólo se podrá efectuar cuando haya impuesto sobre la renta a cargo. Si la depreciación es mayor que el impuesto, el contribuyente seguirá depreciando la inversión en los años siguientes.

Esquemas de interconexión al Sistema Eléctrico Nacional. El “Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Cogeneración Eficiente (CIFER)” puede ser aplicado por personas físicas o morales. La capacidad instalada mayor a 500 kW requiere de un permiso de generación en la modalidad de autoabastecimiento o cogeneración de le CRE.

1.11 Objetivos

- 1) Comprobar que el modelo markoviano predice de forma adecuada el proceso
- 2) Comparar el modelo markoviano con los datos reportados para el mismo periodo de tiempo.
- 3) Aportar un conocimiento matemático aplicado a las energías renovables y dejar un antecedente para una línea de investigación futura.

2. Planteamiento del problema

Se quiere utilizar un modelo markoviano para pronosticar la energía eólica mensual en un parque eólico ubicado en el Istmo de Tehuantepec, el cual representa una aportación importante en la energía eléctrica generada en México.

Las turbinas instaladas son de 93 m de diámetro, esto implica que la turbina tiene un área de barrido de 6789.465 m².

En primer lugar se establece cuál es el clima que se reporta a lo largo del año, encontrando que la temperatura promedio anual se encuentra entre los 26 y 28 grados centígrados en la costa, 20 a 22 grados en los valles centrales y 12 a 15 grados en la sierra.

La velocidad de viento reportado varía de 0 a 8.5 m/s y se hace una clasificación de acuerdo a las velocidades que presenta el viento en un periodo de tiempo.

Tabla 4. Clasificación de las velocidades de viento en Oaxaca.

Clasificación	Velocidad del viento (m/s)
baja	0-6.1
moderada	6.1-6.7
Alta	6.7-8.5

Se procede a calcular la densidad de potencia disponible del viento, que expresa la energía eólica promedio sobre un metro cuadrado (W/m²). La densidad de potencia del viento es proporcional a la suma del cubo de la velocidad instantánea del viento y la densidad del viento, se expresa de la siguiente manera:

$$WPD = \sum_{i=1}^n \rho \cdot v^3 \quad (1)$$

Donde:

ρ : densidad del viento

v : velocidad del viento

La densidad del viento es función de la presión y la temperatura y se calculó con la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2)$$

Donde:

P : es la presión atmosférica a nivel del mar (Pa o $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$)

R : es la constante de los gases en $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

T : temperatura en grados Kelvin (K)

Los datos que se alimentaron fueron los siguientes:

Tabla 5. Datos alimentados para la simulación

Constante de los gases	287 J/kg K
Diámetro de turbina	93 m
Área de barrido	6789.46 m ²
Temperatura	300 K
Presión	101325 Pa

Una vez pronosticada la energía generada en el parque eólico de Oaxaca, se procede a utilizar un modelo usando cadenas de markov, planteando tres escenarios, uno pesimista (velocidades de viento bajas predominantes), el segundo escenario neutral y finalmente el optimista, donde las velocidades de viento predominantes son altas. En este caso, el planteamiento del modelo quedó de la siguiente forma:

$$\underline{\underline{P_1}} = a_0 \underline{\underline{P_0}} \quad (3)$$

Donde:

a_0 : Vector de condiciones iniciales

$\underline{\underline{P_0}}$: Matriz del estado de transición

$\underline{\underline{P_1}}$: Matriz del estado de transición 1

Generalizando entonces para la cadena de markov en forma infinita tendríamos una ecuación de la siguiente forma:

$$\underline{\underline{P_{n+1}}} = a_0 \underline{\underline{P_n^{n+1}}} \quad (4)$$

Una vez calculado lo anterior, se procede a realizar un análisis de sensibilidad paramétrica, donde se varía el vector de las condiciones iniciales, manteniendo la matriz del estado de transición igual.

Ejemplo:

a) Escenario pesimista

$$a_1 = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$a_0 = (0.6 \ 0.4 \ 0)$$

$$a_0 = (0.8 \ 0.2 \ 0)$$

b) Escenario neutral

$$a_0 = (0.5 \ 0.5 \ 0) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$a_0 = (0.5 \ 0 \ 0.5)$$

c) Escenario optimista

$$a_0 = (0 \ 0 \ 1) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$a_0 = (0 \quad 0.2 \quad 0.8)$$

$$a_0 = (0.2 \quad 0 \quad 0.8)$$

Después, se procedió a elaborar un análisis de sensibilidad cambiando la matriz del estado de transición y manteniendo el vector de las condiciones iniciales igual.

Las matrices que se utilizaron fueron las siguientes:

$$1) P_0 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$2) P_0 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \end{pmatrix}$$

$$3) P_0 = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$4) P_0 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$5) P_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En cada caso de la simulación, el número de pasos máximo de simulación fueron diez, donde cada paso de transición equivale a 33 horas.

3. Marco Teórico

3.1 Sistemas y ambiente de un sistema

Para modelar un sistema, es necesario entender el concepto de un sistema y la frontera de un sistema. Un *sistema* es definido como un grupo de objetos que están unidos e interactúan entre sí para un propósito particular. Un sistema puede afectarse por los cambios que ocurren fuera de él, a éstos se les denomina ambiente del sistema, en el modelado de los sistemas, es necesario decidir sobre el sistema y su ambiente, esta decisión podría depender del propósito de estudio.

3.2 Componentes de un sistema

Un sistema está compuesto por una entidad, una *entidad* es un objeto de interés en el sistema, un *atributo* es una propiedad de una entidad y una *actividad* representa un periodo de tiempo de cierta duración.

El *estado* de un sistema está definido por un grupo de variables necesarias para describir el sistema en cualquier momento. Un *evento* es definido como una ocurrencia instantánea que puede cambiar el estado de un sistema, dicho evento puede ocurrir dentro o fuera del sistema⁸.

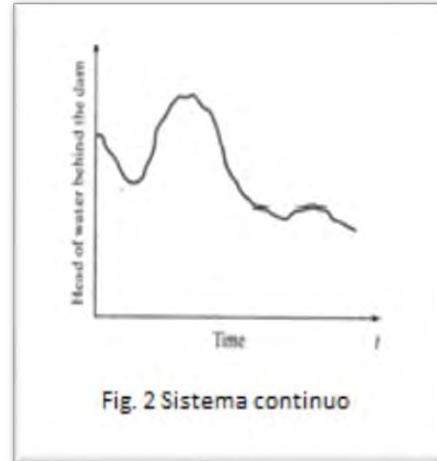
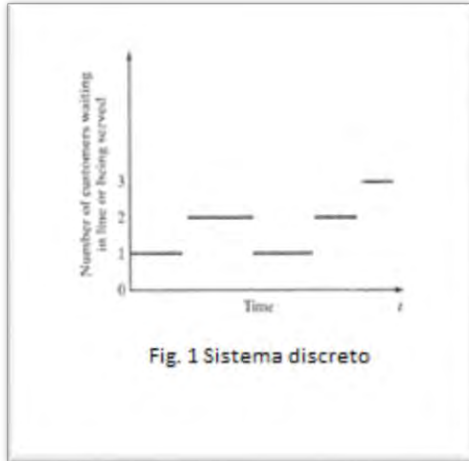
3.3 Clasificación de los sistemas

Los sistemas se pueden clasificar en discretos y continuos. Un sistema discreto es aquel en el que la variable de estado sólo cambia en un conjunto de puntos en el tiempo, un ejemplo es un banco, la variable de estado son los clientes, y sólo cambia cuando éstos llegan o cuando el servicio está completado, mientras que el continuo es aquel en donde el sistema puede cambiar de forma continua en todo un intervalo de tiempo. Un ejemplo típico es la cabeza de agua en una represa, que después de una tormenta, el nivel del agua sube y es extraída de la represa para controlar las inundaciones y generar electricidad.⁹

Para ver esta explicación de manera gráfica ver las figuras 1 y 2 que se muestran abajo.

⁸ Rubinstein, R. *Modern Simulation and Modeling*. Wiley-Interscience Publication: USA, 1998.

⁹ Banks, J. y Carson, J. et al. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall: USA, 2005.



La evaporación en este caso también disminuye el nivel del agua, la fig. 2 muestra cómo la cabeza hidráulica que es nuestra variable de estado, cambia a lo largo del tiempo.

3.4 Modelo de un sistema

Un modelo es definido como la representación de un sistema que tiene por objetivo estudiarlo, en la mayoría de los estudios es necesario considerar esos aspectos del sistema que afectan el problema bajo investigación. Esos aspectos son representados en un modelo del sistema, así que un modelo por definición, es la simplificación del sistema.

Los componentes de un sistema son entidades, atributos y actividades, los modelos sin embargo contienen solo aquellos componentes que son relevantes para el estudio.

3.5 Tipos de modelos

Los modelos pueden ser clasificados en matemáticos y físicos, un modelo matemático usa notación simbólica y ecuaciones matemáticas para representar un sistema. La simulación de un modelo es un tipo de modelo matemático de un sistema.

La simulación de los modelos podrían ser clasificados en estáticos y dinámicos, determinísticos o estocásticos, discretos o continuos. La simulación de un modelo estático, a veces llamado simulación Monte Carlo, representa un sistema en un punto particular en el tiempo. Los modelos de simulación dinámica representan sistemas que cambian a lo largo del tiempo, por ejemplo, la simulación de un banco de 9:00 a.m. a 4:00 p.m.

La simulación de modelos que no contienen variables aleatorias son determinísticos. Los modelos determinísticos tienen un conjunto de datos de

entrada conocidos, los cuales generarán valores únicos en la salida. Por ejemplo, si en el consultorio de un dentista todos los pacientes llegan en punto en su cita, el comportamiento del sistema sería determinístico.

Un modelo de simulación estocástico tiene una o más variables aleatorias como datos de entrada, por lo tanto, darán resultados aleatorios.

3.6 Procesos estocásticos

Un proceso estocástico se define como una colección indexada de variables aleatorias $\{X_t\}$, donde el índice t toma valores de un conjunto T dado¹⁰. Con frecuencia T se toma como el conjunto de enteros no negativos y X_t representa una característica de interés mensurable en el tiempo t . Por ejemplo, X_t puede presentar los niveles de inventario al final de la semana t .

Los procesos estocásticos son de interés para describir el comportamiento de un sistema en operación durante algunos periodos. Un proceso estocástico tiene la siguiente estructura.

La condición actual del sistema puede estar en una $M + 1$ categorías mutuamente excluyentes llamadas **estados**. Por conveniencia en la notación, estos estados se etiquetan $1, 2, \dots, M$. La variable aleatoria X_t representa el *estado del sistema* en el tiempo t , de manera que sus únicos valores posibles son $0, 1, 2, \dots$. De esta forma, los procesos estocásticos $\{X_t\} = \{X_0, X_1, X_2, \dots\}$ proporcionan una representación matemática de cómo evoluciona la condición del sistema físico a través del tiempo.

Este tipo de procesos se conocen como procesos estocásticos de *tiempo discreto* con *espacio de estado finito*. (Hillier *et al.*)

¹⁰ Hillier, F y G. Lieberman. *Introducción a la investigación de operaciones*. Mc. Graw Hill, México, 2007.

3.7 Cadenas de Markov

Una cadena de Markov es una sucesión de ensayos similares u observaciones en la cual cada ensayo tiene el mismo número finito de resultados posibles y en donde la probabilidad de cada resultado para un ensayo dado depende sólo del resultado del ensayo inmediatamente precedente y no de cualquier resultado previo.¹¹

Un proceso estocástico se considera markoviano si tiene la siguiente propiedad esencial:

Se dice que un proceso estocástico $\{X_t\}$ tiene la propiedad markoviana si $P\{X_{t+1}=j \mid X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i\} = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$, para $t = 0, 1, \dots$ y toda sucesión $i, j, k_0, k_1, \dots, k_{t-1}$.

En otras palabras, esta propiedad markoviana establece que la probabilidad condicional de cualquier evento pasado y el estado actual $X_t = i$, es independiente de los eventos pasados y sólo depende del estado actual del proceso.

Las probabilidades condicionales $P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$ de una cadena de Markov se llaman **probabilidades de transición** (de un paso). Si para cada i y j ,

$$P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\} = P\{X_1 = j \mid X_0 = i\}, \text{ para toda } t = 1, 2, \dots$$

entonces se dice que las probabilidades de transición (de un paso) son estacionarias. Así, tener **probabilidades de transición estacionarias** implica que las probabilidades de transición no cambian con el tiempo. La existencia de probabilidades de transición (de un paso) estacionarias también implica que, para cada i, j y n ($n = 0, 1, 2, \dots$),

$$P\{X_{t+n} = j \mid X_t = i\} = P\{X_n = j \mid X_0 = i\}$$

para toda $t = 0, 1, \dots$. Estas probabilidades condicionales se llaman **probabilidades de transición de n pasos**.

Para simplificar la notación de las probabilidades de transición estacionarias, sea

$$p_{ij} = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$$

$$p_{ij}^n = P\{X_{t+n} = j \mid X_t = i\}$$

Así las probabilidades de transición de n pasos p_{ij}^n son simplemente la probabilidad condicional de que el sistema se encuentre en el estado j exactamente después de

¹¹ Artículo " Métodos estadísticos en Ciencias de la vida", en www.bioingenieria.edu.ar, consultada el 25 de junio de 2014.

n pasos (unidades de tiempo), dado que comenzó en el estado i en cualquier tiempo t . Cuando $n = 1$ observe que $p_{ij}^{(1)} = p_{ij}^1$.

Como las p_{ij}^n son probabilidades condicionales, deben ser no negativas y, como el proceso debe hacer una transición a algún estado, deben satisfacer las propiedades

$$p_{ij}^n \geq 0, \text{ para toda } i, j, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\sum_{j=0}^M p_{ij}^n = 1, \text{ para toda } i, j, n = 0, 1, 2, \dots$$

Una notación conveniente para representar las probabilidades de transición de n pasos es *la matriz de transición de n pasos*.

$$P^{(n)} = \begin{pmatrix} P_{00}^{(n)} & \dots & P_{0M}^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M0}^{(n)} & \dots & P_{MM}^{(n)} \end{pmatrix}$$

La probabilidad de transición de en un renglón y columna dados es la de transición del estado en ese renglón al estado en la columna. Cuando $n = 1$, el superíndice n no se escribe y se hace referencia a ésta como una matriz de transición.

Las cadenas de Markov que se estudian en este capítulo tienen las siguientes propiedades:

1. Un número finito de estados
2. Probabilidades de transición estacionarias.

3.8 Clasificación de estados en cadenas de Markov

En las cadenas de Markov es importante hablar sobre los estados a largo plazo conforme al número de transiciones tiende a infinito. En este caso necesitamos un procedimiento sistemático que sirva para predecir el comportamiento a largo plazo del sistema.

Cadena de Markov irreducible. Se dice que una cadena de Markov es irreducible si cada estado E_j se puede alcanzar desde cualquier otro estado E_i después de un número finito de transiciones, es decir, para $i \neq j$,

$$P_{ij}^n > 0, \text{ para } 1 \leq n < \infty$$

En este caso todos los estados de la cadena se comunican.¹²

Estados de conjunto cerrado y absorbentes. En una cadena de Markov, se dice que un conjunto C de estados está cerrado si el sistema, una vez en uno de los estados de C , permanecerá en C indefinidamente. Un ejemplo especial de un conjunto cerrado es un solo estado E_j con probabilidad de transición $p_{ij} = 1$. En este caso, E_j se llama **estado absorbente**. Todos los estados de una cadena irreducible deben formar un conjunto cerrado y ningún subconjunto puede ser cerrado. El conjunto cerrado C también debe satisfacer todas las condiciones de una cadena de Markov pero no se profundizará más este punto porque no es el objetivo de este estudio.

3.9 Clasificación de los procesos de Markov según la naturaleza discreta o continua de las variables.

Esta clasificación guarda relación con la naturaleza discreta o continua del espacio de estados de la variable $X(t)$ y del parámetro tiempo t .

a) Naturaleza del espacio de estados

Cuando $X(t)$ representa una magnitud continua (tensión o corriente eléctrica, fuerza, energía, potencia, presión, etc.), el espacio de estados de $X(t)$ deberá ser un intervalo de números reales, y se hablará entonces de un *proceso de Markov con estados continuos* o brevemente proceso de Markov. En cambio cuando $X(t)$ representa una magnitud discreta (cantidad de artículos en stock en un almacén, número de líneas en servicio en un sistema de transmisión de energía eléctrica, cantidad de clientes en un sistema de atención y espera, etc.) el espacio de estados de $X(t)$ será una secuencia finita o numéricamente infinita de enteros, y se hablará entonces de un proceso de Markov con estados discretos” o cadenas de Markov.

b) Naturaleza del parámetro tiempo

Dada la naturaleza dinámica del sistema cuyo comportamiento describe, la definición de la variable aleatoria $X(t)$ requiere la especificación del parámetro t , es decir del conjunto de instantes en que se puede observar los estados del sistema. Así si las observaciones se realizan en cualquier instante del continuo ($t \geq 0$), se habla de un proceso o cadena de markov de parámetro continuo, mientras que en otras ocasiones las observaciones se efectúan en determinados instantes de tiempo (p.ej. de hora en hora, $t = 0, 1, 2, \dots$) y en este caso se habla de un proceso o Cadena de Markov de parámetro discreto.

¹² Taha, H. *Investigación de operaciones*. Prentice Hall: México, 1997.

Lo anterior se resume en el siguiente recuadro.

Tabla 6. Clasificación de las Cadenas de Markov.

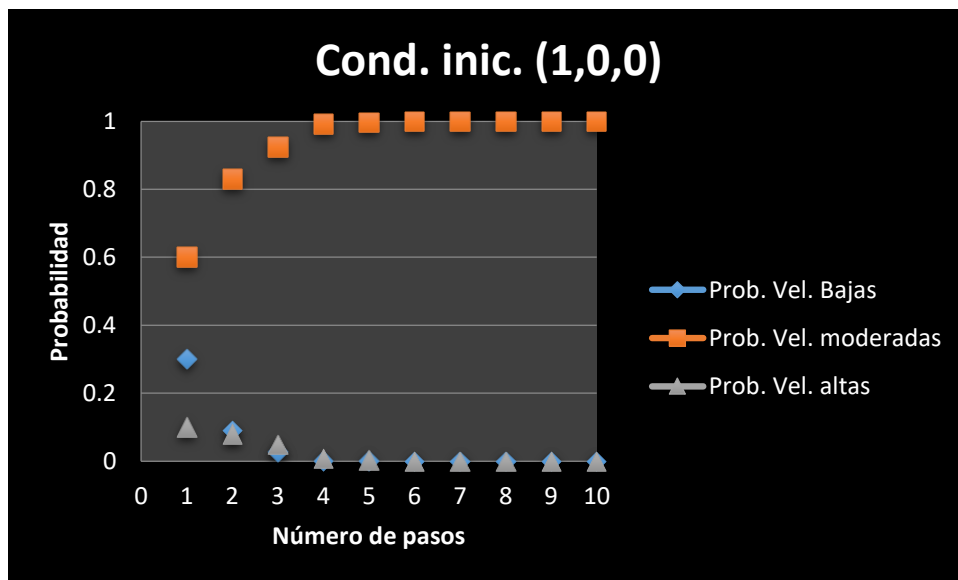
	Naturaleza de los estados	
Naturaleza del parámetro tiempo	Discreto	Continuo
Discreto (t= 0,1,2,)	Cadenas de Markov de parámetro discreto	Procesos de Markov de parámetro discreto
Continuo (t ≥0)	Cadenas de Markov de parámetro continuo	Proceso de Markov de parámetro continuo

Con referencia a las Cadenas de Markov, de parámetro discreto o continuo, los distintos estados de la variable $X(t)$ se suelen representar genéricamente con letras i, j, k , etc. En particular los valores de dichos estados dependen de la naturaleza del sistema que se modela, pero habitualmente se utilizan números enteros: $0, 1, 2, \dots, m$.

4. Resultados y Análisis

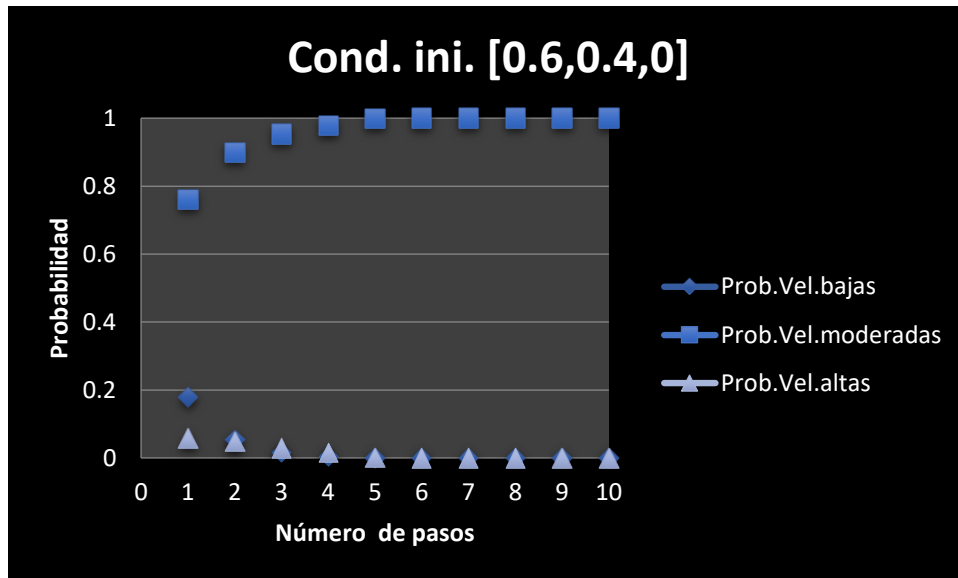
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada simulación y el comparativo con el error porcentual promedio calculado para la energía eólica reportada y la calculada a través del proceso markoviano.

a) Simulación cambiando el vector de las condiciones iniciales.



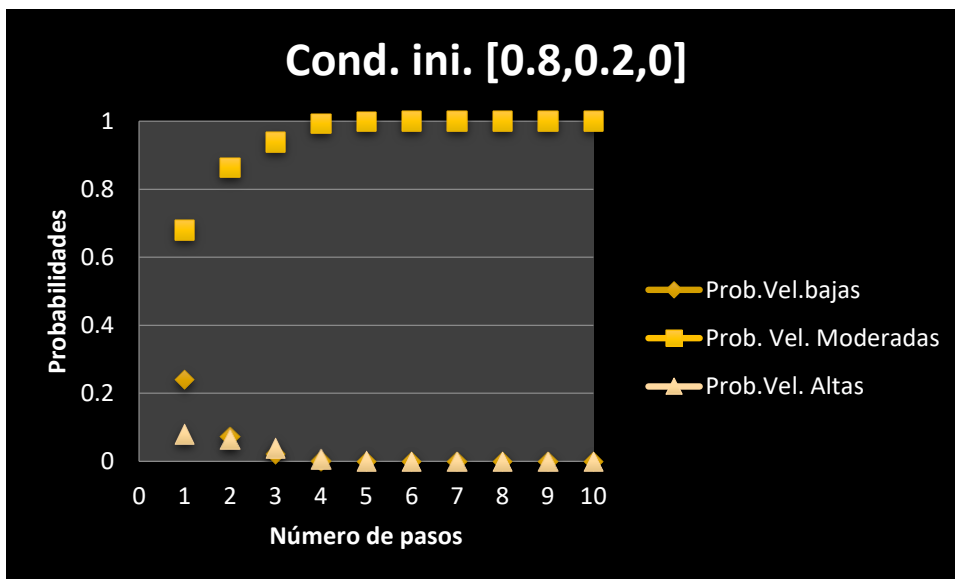
Gráfica 1. Escenario pesimista (sólo velocidades bajas).

En esta gráfica se ve claramente que aunque inicialmente las velocidades bajas tienen una probabilidad de 100% de prevalecer, el proceso nos indica que las velocidades moderadas son las que gobiernan el proceso, el primer periodo de tiempo se incrementa sustancialmente hasta un 60% para luego alcanzar un 100% de probabilidad y un estado estacionario, mientras que las velocidades bajas y altas se estabilizan a partir de $t = 4$ alcanzando una probabilidad cero en el estado estacionario.



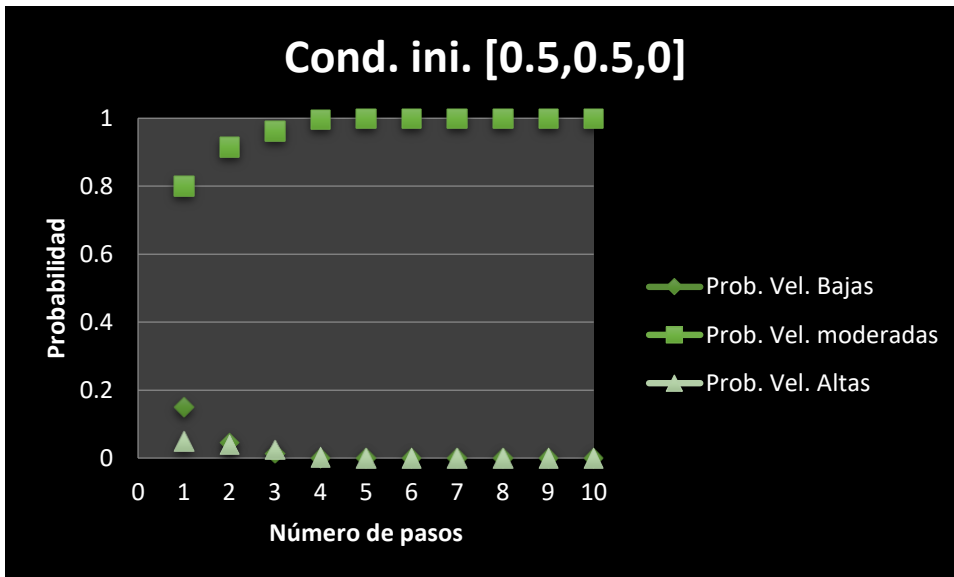
Gráfica 2. Escenario pesimista (velocidades bajas al 60% probabilidad)

En la gráfica 2, se observa que el comportamiento es el mismo al anterior y que nuevamente las velocidades moderadas prevalecen en el proceso, poniendo muy por debajo las velocidades altas y bajas.



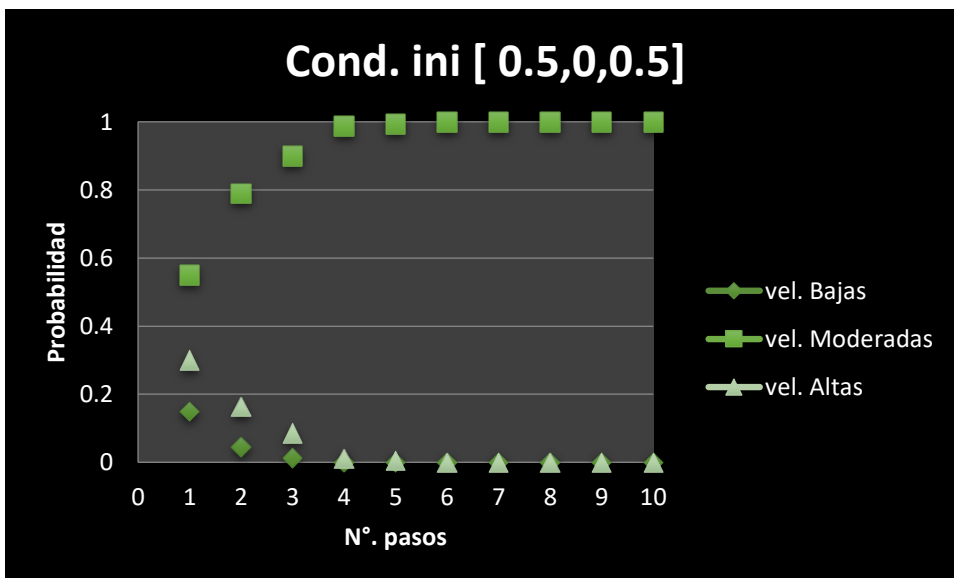
Gráfica 3. Escenario pesimista (velocidades bajas al 80% probabilidad)

Este gráfico, el comportamiento es exactamente el mismo. Cuando se llega al primer periodo las velocidades que incrementan su probabilidad de aparición son las moderadas, mostrando un crecimiento acelerado desde el primer periodo de tiempo y luego alcanzando el estado estacionario, llegando a un 100% de probabilidad.



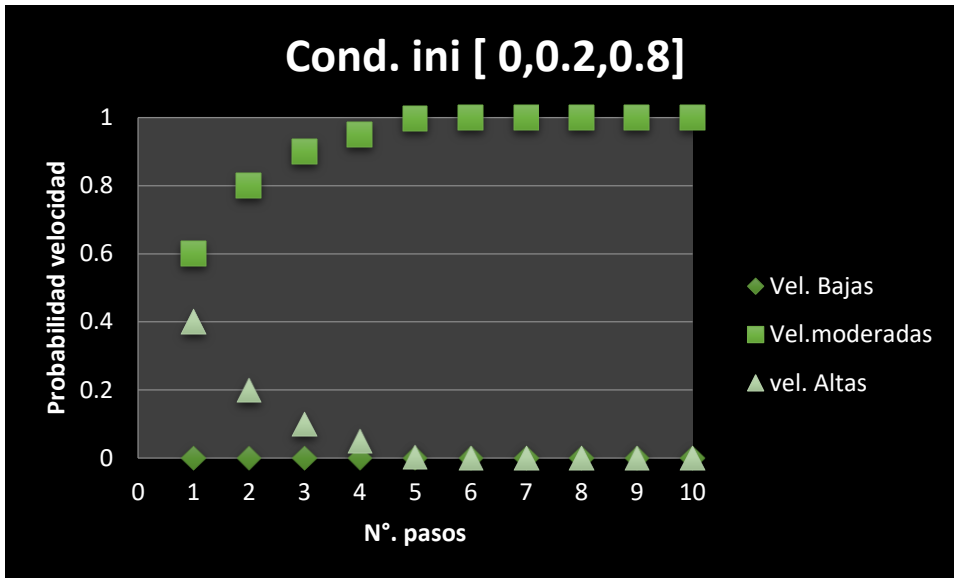
Gráfica 4. Escenario neutral (50% velocidades bajas y 50% velocidades moderadas)

En la gráfica 4, el vector de las condiciones iniciales nos muestra una probabilidad igual en las velocidades bajas y moderadas y a pesar de esto, las velocidades moderadas continúan gobernando todo el proceso, el primer periodo de tiempo alcanzan el 80% de probabilidad mientras que las otras dos bajan abruptamente.



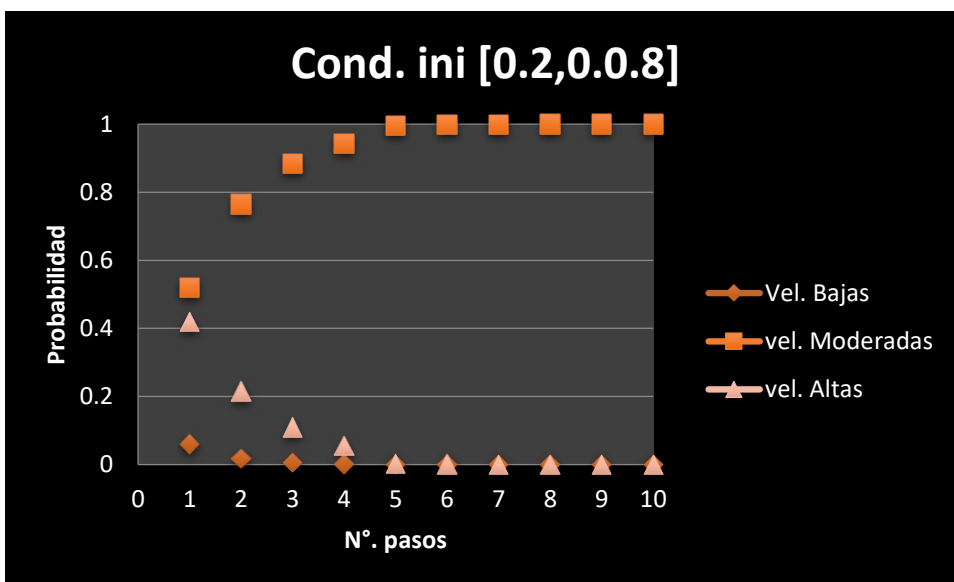
Gráfica 5. Escenario neutral (50% velocidades bajas y 50% velocidades altas)

En esta gráfica, se muestra prácticamente el mismo comportamiento, el vector inicial nos muestra que aunque las velocidades moderadas valen cero, finalmente alcanzan la máxima probabilidad en el periodo 4.



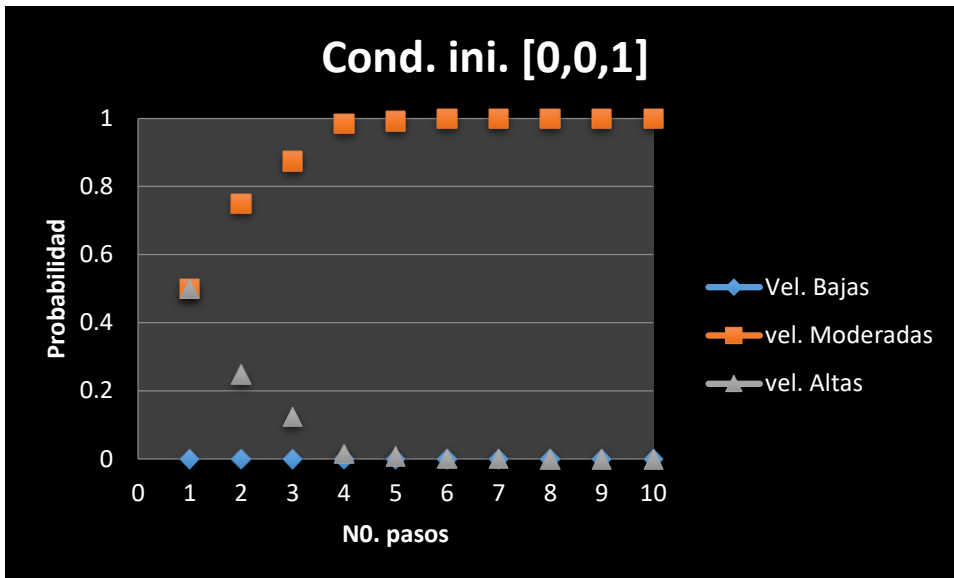
Gráfica 6. Escenario optimista (80% velocidades altas y 20% velocidades moderadas)

Aquí, las velocidades moderadas tienen un incremento no tan rápido, en el primer periodo de tiempo alcanzan el 60% de probabilidad, en el segundo periodo llegan al 80% y luego alcanzan el régimen permanente.



Gráfica7. Escenario optimista (20% velocidades bajas y 80% altas)

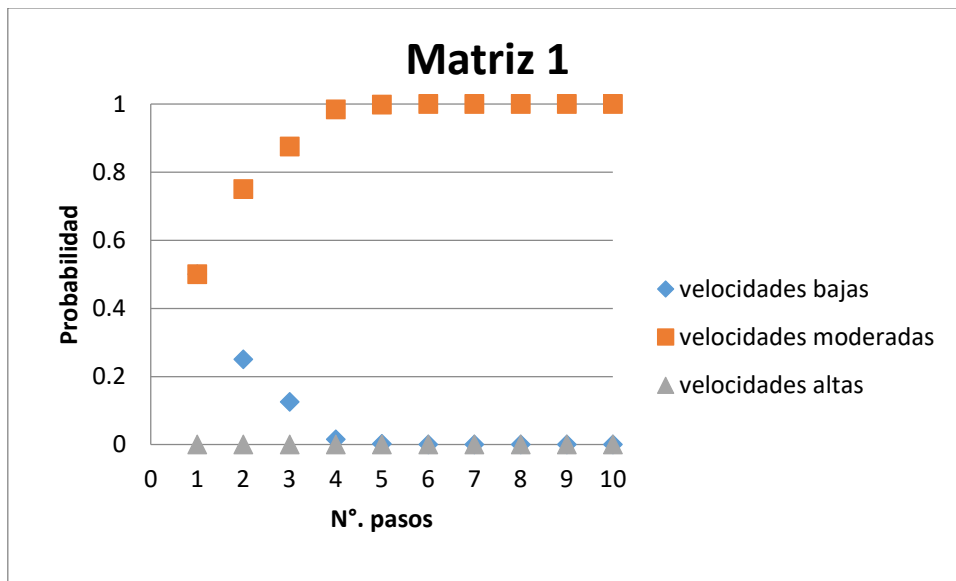
Se observa que aunque la probabilidad mayor al inicio del proceso es para las velocidades altas, las moderadas son las que prevalecen y al primer periodo, comienzan con una probabilidad del 50%, mientras que las altas y bajas tienden a bajar rápidamente hasta cero.



Gráfica 8. Escenario optimista (100% probabilidad de velocidades altas)

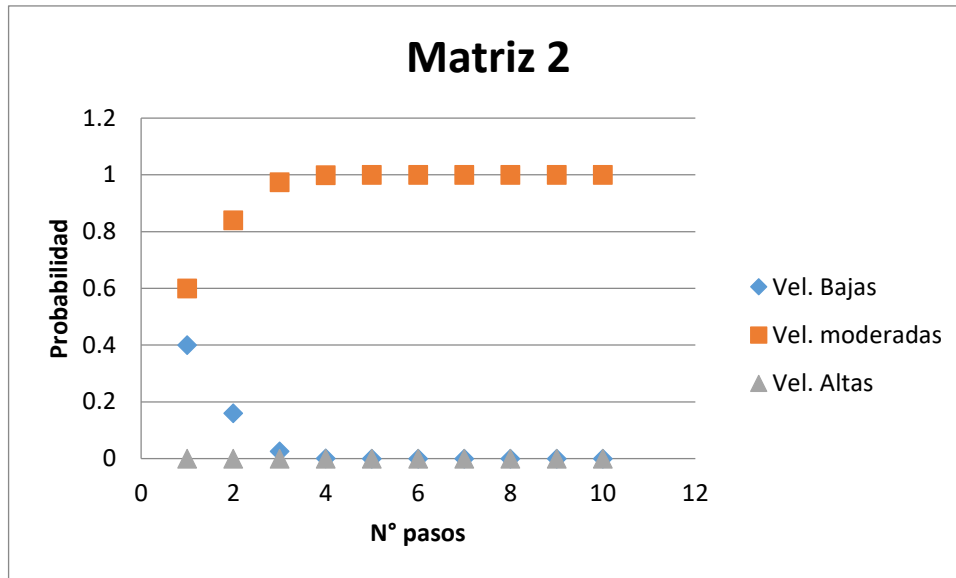
En esta gráfica se observa un comportamiento un poco diferente al inicio del proceso, las velocidades altas y moderadas coinciden en el mismo valor de probabilidad, 50 y 50% respectivamente en $t = 1$, luego las velocidades moderadas comienzan a prevalecer en el proceso hasta alcanzar un estado estacionario.

b) Simulación cambiando la matriz del estado de transición



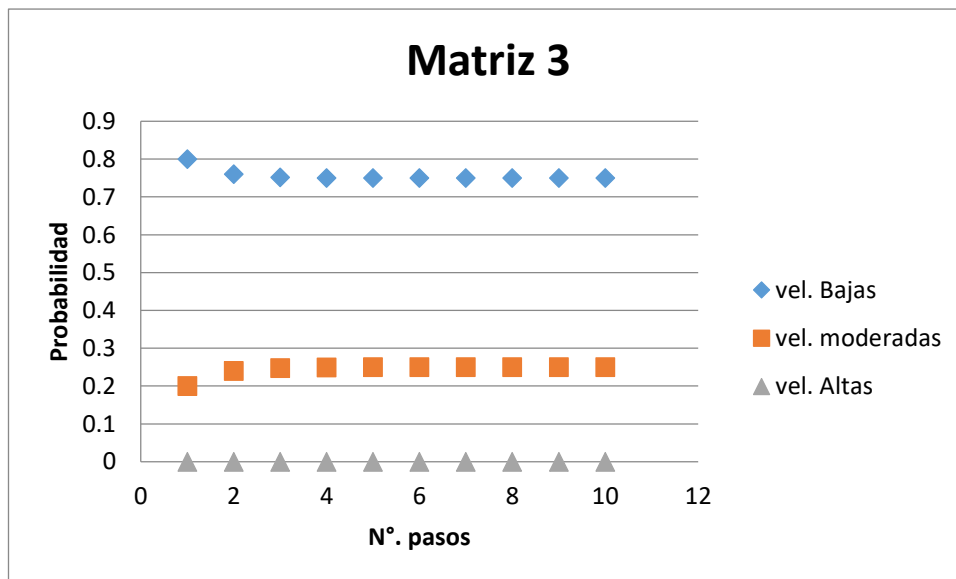
Gráfica 9. Simulación con la matriz 1

Cuando cambiamos las probabilidades de la matriz del estado de transición, notamos el mismo comportamiento que la simulación cuando cambiamos el vector de las condiciones iniciales, en $t = 1$ las velocidades moderadas y bajas tienen una probabilidad igual al 50%, la velocidad baja sigue en decremento hasta alcanzar un valor igual a cero de probabilidad y las moderadas se incrementan hasta alcanzar la estabilidad en 100% de probabilidad.



Gráfica 10. Simulación con la matriz 2

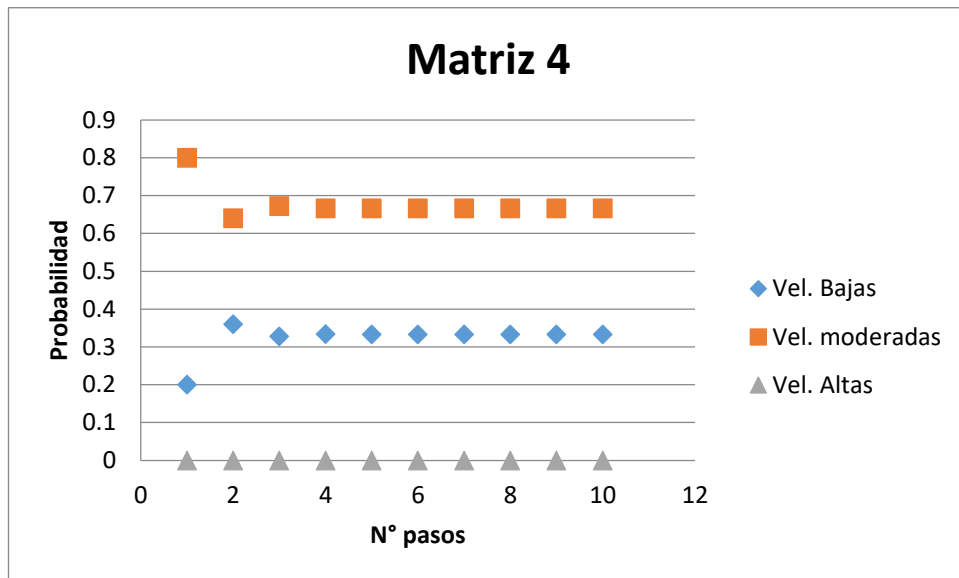
En la gráfica 10, nuevamente observamos el mismo comportamiento de las gráficas anteriores.



Gráfica 11. Simulación con la matriz 3

En esta gráfica ocurre algo muy peculiar, las velocidades que predominan son las velocidades bajas, alcanzando una probabilidad del 80% en $t = 1$ y luego disminuyendo hasta 75% en $t = 2$, mientras que las velocidades moderadas alcanzan sólo un valor máximo de del 25%, entonces nos podemos percatar que

durante todo el resto del proceso para cualquier periodo de tiempo, la suma de las probabilidades de las velocidades bajas y moderadas es igual al 100%.



Gráfica 12. Simulación con la matriz 4

La gráfica 12, nos muestra nuevamente que las velocidades moderadas predominan en todo el proceso, comenzando con 80% de probabilidad y luego disminuyendo hasta 70%, mientras que las bajas comienzan en 20% y luego se incrementan hasta 30%, viendo de forma obvia, que las velocidades altas permanecen con una probabilidad igual a cero.

Luego para finalizar, se hizo una simulación con la matriz 5, como se observa en la gráfica siguiente, mostrando un comportamiento diferente al de los anteriores.

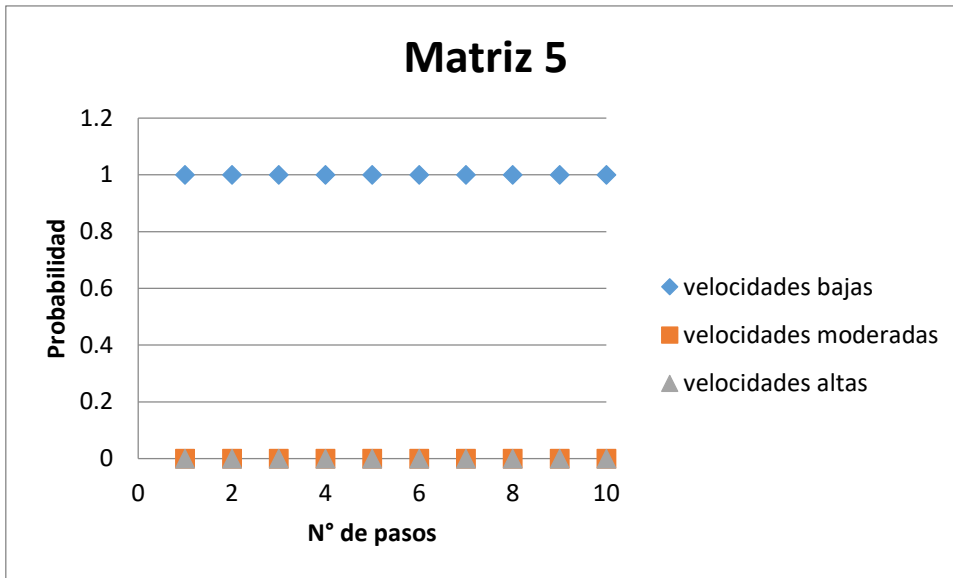
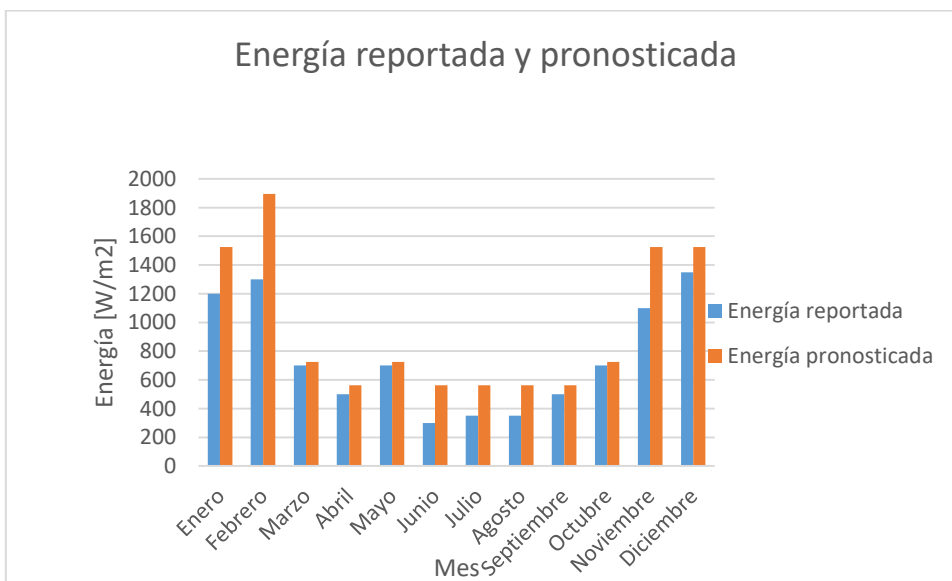


Gráfico 13. Simulación con la matriz 5

En esta gráfica, se observa que las velocidades bajas gobiernan todo el proceso desde el inicio hasta el fin. Seguramente si pudiéramos extrapolar la gráfica, observaríamos que sigue de forma indefinida este procedimiento hasta el infinito.

Para finalizar, se hizo una gráfica comparativa entre la energía reportada y pronosticada y se observó que en la mayoría de los meses, la energía pronosticada excedió a la energía reportada sobre todo en los meses de Enero, Febrero, Noviembre y Diciembre, se calculó la desviación estándar y el error porcentual, los cuales se encuentran reportados en el siguiente capítulo.



Gráfica 14. Comparación entre energía reportada y pronosticada

5. Conclusiones

El modelo markoviano planteado para pronosticar la energía eólica que se genera en un tiempo dado nos permite aproximarnos de una forma viable a la realidad, pero para este tipo de pronósticos es más adecuado que se manejen lapsos de tiempo cortos como por ejemplo horas o minutos.

El tipo de cadena de markov es de estado continuo y de un horizonte finito. En general es un proceso que tiene memoria a corto plazo, es decir, sólo influye el estado inmediato anterior, este tipo de modelos pueden pronosticar la energía eólica generada en un parque eólico gracias a que el viento y en general las condiciones climáticas tienen una naturaleza aleatoria, por eso es que resulta útil usar este tipo de modelación matemática. Cabe destacar que usar parámetros estadísticos es una medida adecuado para conocer si el modelo se ajusta bien a la realidad, en este trabajo un porcentaje de error del 30% y una desviación estándar de 954.87 ± 503.55 W/m² de la simulación con el modelo markoviano, no obstante, una premisa estadística nos dice que entre nuestro espacio muestral sea mayor, serán mejor nuestros cálculos, para este caso sólo pude obtener doce datos, desde enero hasta diciembre, seguramente con mayor cantidad de datos, la desviación estándar tendría un mejor valor.

Otro punto que es importante destacar es que dentro de las Cadenas de Markov hay diferentes clasificaciones y para este proceso en particular, es un evento de tiempo continuo y la variable aleatoria que en este caso es la energía producida debida al viento, es de naturaleza continua también.

La aportación que hago con este trabajo es dejar una línea de investigación en este campo, donde estamos en una etapa de transición energética a nivel mundial, quizá concluyendo este tema con una serie de preguntas que quedan abiertas. ¿La energía eólica como otras más, es realmente viable y sustentable para los próximos cien años? ¿Las políticas públicas y los marcos regulatorios, en especial de México, permitirán desplazar totalmente la energía de las fuentes fósiles en renovables antes que el petróleo se agote? ¿Las energías renovables estarán al alcance de la mayoría de la población mundial?

6. Bibliografía general

1. Taha, H. *Investigación de operaciones, una introducción*. Prentice Hall: México, 1998.
2. Hillier, F y G. Lieberman. *Introducción a la investigación de operaciones*. Mc. Graw Hill, México, 2007.
3. Quevedo, H. *Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Ed. Patria: México, 2008.
4. Banks, J., Carson, J, Nelson, B et al. *Discrete-event system simulation*. Pearson: USA, 2005.
5. Marshall, K. y Oliver, R. *Decision Making and forecasting*. McGraw-Hill: Singapore, 1995.
6. Rubinstein , R y Melamed, B. *Modern Simulation and Modeling*. Wiley-Interscience Publication: USA, 1998.
7. Carpióne, A., Giorgio, M. y Langella, R. *Markov chain modeling for very short-term wind power forecasting*. Electric Power Systems Research: Vol. 122, pp. 152-158 (2015).
8. Sánchez Ismael. *Short-term prediction of wind energy production*. *International Journal of Forecasting*. International Journal of Forecasting: Vol. 22 pp. 43-56 (2006).
9. Hu, Z., Xiong S., Su Q., Fang Z. *Finite Markov chain analysis of classical differential evolution algorithm*. Journal of Computational and Applied Mathematics: Vol. 268 pp.121-134 (2014).
10. Kim, Y., Ahn K., Park C. *Decision making of HVAC system using Bayesian Markov chain Monte Carlo method*. Energy and Buildings: Vol. 72 pp.112-121 (2014).

11. Qin, T y Boccelli D.L. *Estimating demands with a Markov chain Monte Carlo approach*. Procedia Engineering: Vol. 70 pp.1386-1390 (2014).