

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



ANÁLISIS DE INVERSIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA
APLICACIÓN PARA UNA CENTRAL EÓLICA EN MÉXICO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN ECONOMÍA

PRESENTA

JONATHAN RAMÍREZ CRUZ

DIRECTOR DE TESINA

DR. ENRIQUE FELIX GARZA ESCALANTE

MÉXICO, D.F. JUNIO 2015

Agradecimientos

Gracias al Dr. Enrique Garza E. por sus pláticas, motivarme y darme la oportunidad de realizar la tesina bajo su dirección. Así como el tiempo dedicado por sus observaciones, consejos para mejorar la tesis y por todo lo que aprendí durante la realización de la tesina.

Gracias a la Dra. Sonia Beatriz Di Giannatale Menegalli coordinadora de seminario de titulación por sus consejos para mejorar mi presentación en público, así como sus correcciones de mis presentaciones a lo largo del curso.

Gracias al Dr. Juan Rosellón Díaz por aceptar ser lector de tesina, gracias por todas sus indicaciones y comentarios para mejorar la tesina.

Índice general

Resumen	4
Introducción	6
1. Antecedentes	8
1.1. Revisión de literatura académica	8
1.2. Revisión de literatura CFE	10
2. Modelo de Valor presente neto	14
2.1. Introducción	14
2.2. Estructura de tasa de interés	15
2.3. Enfoque binomial	17
2.4. Modelo de Ho Lee	18
2.5. Modelo de malla binomial	19
3. Análisis de información	22
3.1. Modelo Ho lee	22

ÍNDICE GENERAL	3
3.2. Precio de la energía	25
3.3. Inversión y capacidad de producción	27
3.4. Valor presente neto	29
3.5. Resultado	29
4. Conclusiones	35
A. Modelo Nelson-Siegel	37
B. Código Matlab	40
Bibliografía	43

Resumen

A largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos de análisis para la toma de decisiones, entre los que destacan el método de flujo descontados (Valor Presente Neto) y de opciones. El método más empleado es el de valor presente que permite conocer el poder de compra equivalente a una serie de flujos de efectivo.

La idea central de este trabajo consiste en hacer un análisis de inversión de una central eléctrica, en particular para una central eólica en México. Esta técnica es aplicada para inversiones privadas para la generación de energía eléctrica para venderla a la comisión federal de electricidad. Para esto se consideran incertidumbres en los precios que paga Comisión Federal de Electricidad (CFE) a los Productores Independientes de Energía (PIE), la tasa de interés, nivel de generación de energía y la inversión.

Para la incorporación de incertidumbre en la tasa de interés se hace uso de la herramienta del modelo de Ho-Lee, donde su punto de partida es el modelo de Nelson-Siegel. Para modelar los posibles precios de la energía para los siguientes periodos se emplea el modelo de malla binomial. Finalmente para la incorporación de incertidumbre en la inversión y producción se tomarán dos estados posibles para cada variable (bajo y

alto), estos basados en datos de Comisión Federal de Electricidad.

Como no existen restricciones de valor presente neto, cabe la posibilidad de que existan valores presentes netos negativos, entonces se busca el nivel más bajo del precio de la energía para que el todos los valores presente netos sean positivos. Para dar mayor certidumbre aun inversionista se puede contratar un seguro para evitar perdidas.

Introducción

Las empresas en el negocio del petróleo y gas han usado diversas técnicas de análisis de decisión. Es difícil discernir los beneficios del enfoque de opciones sobre estos temas. La mayoría de los ejemplos publicados realizan un análisis tradicional de flujo descontado.

La incertidumbre y la complejidad son costumbres en el ramo del petróleo y gas. En la actualidad, casi todos los grandes costos de capital de una firma es evaluado usando técnicas de análisis de decisión. En una evaluación típica, los analistas de una firma utilizan el análisis de sensibilidad para identificar las principales incertidumbres, evaluar las incertidumbres claves, así como la construcción de arboles de decisión o la simulación de modelos de flujos descontados.

El objetivo de este trabajo es realizar el análisis de una inversión en una central eléctrica se aplica a una central eólica, diversos estudios muestran que México tiene un alto potencial en la generación de energía eólica. México tiene un potencial de 40 GW (representa el 16 % de lo que actualmente se consume), del cual en 2013 se genero 2.3 GW.

Este trabajo está organizado como sigue. En el capítulo 1 se presenta la revisión de literatura académica y CFE. En el capítulo 2 se hace una revisión de los modelos a emplear para calcular el valor presente neto, en particular del modelo de Ho-Lee y de malla binomial. El modelo de Ho-Lee se emplea para la modelación de la tasa para los periodos posteriores, donde el punto de partida es el modelo de Nelson -Siegel para obtener las tasa spot que prevalece en los siguientes años. El modelo de malla binomial se emplea para calcular los posibles precios en los siguientes años. En el capítulo 3 se aplica el método de valor presente neto aun proyecto de una central eléctrica en particular para una central eólica y como no existe restricción del valor presente neto, esta puede ser negativa, es decir, no factible para inversión. Este problema se puede solucionar con un seguro para evitar perdidas, el seguro puede ser modelado con un put americano. Finalmente las conclusiones se presentan en el capítulo 4.

Antecedentes

A lo largo del tiempo las empresas han hecho un amplio uso de métodos de análisis para la toma de decisiones. Los analistas identifican las principales incertidumbres, y construyen arboles de decisión o modelos de flujos del proyecto. Muchas empresas especialmente las que se dedican al sector energético, como el petróleo, el gas y la generación de energía eléctrica han utilizado amplias técnicas de análisis de decisión para saber si hay oportunidades de exploración y desarrollo de nuevos proyectos. Existe amplia literatura sobre el tema, de los beneficios del enfoque de opciones que consideran incertidumbre en los flujos del proyecto.

1.1. Revisión de literatura académica

En esta sección se hace un breve resumen de literatura sobre temas de inversiones en proyectos relacionados con energía.

Geoffrey R. (2006) realiza un análisis de opción real para el costo de inversión en la construcción de una planta nuclear en Texas, EUA. Las incertidumbres incorporadas

por el autor son el precio de la energía eléctrica, el costo de construcción y la generación de energía eléctrica. El autor realiza 1000 simulaciones del valor presente neto, donde encuentra una distribución normal.

Utilizando el enfoque de opciones reales determina la prima de riesgo asociado a la incertidumbre de los ingresos netos. Geoffrey realiza un análisis de sensibilidad del costo construcción con respecto a las incertidumbres para reducir la varianza del ingreso neto.

Por otra parte J. Smith y K. McCardle estudian el análisis de decisión para evaluar proyectos en el negocio de petróleo y gas. El análisis se centra en la valoración de opciones, describen la forma en el cual se puede incorporar las opciones en la toma de decisión y mencionan cuales son las lecciones aprendidas al evaluar inversiones en petróleo y gas.

El trabajo lo realizan en conjunto con una importante firma, en donde primero realizan un estudio de sensibilidad para identificar las principales incertidumbres, estas pueden ser el precio del petróleo, la producción, reservas y la tecnología. Para su trabajo construyen un árbol de decisión y calculan el valor presente.

A. Borison en su trabajo realiza un resumen amplio de los diferentes enfoques de opciones reales para un potencial amplio en una firma. En cada enfoque se explican o se pueden deducir, difieren ampliamente de un enfoque para abordar y son incluso contradictorias. Además discute las dificultades para aplicar los diferentes enfoques, los pros y contras de los diversos enfoques. Finalmente realiza un ejemplo de cada enfoque.

1.2. Revisión de literatura CFE

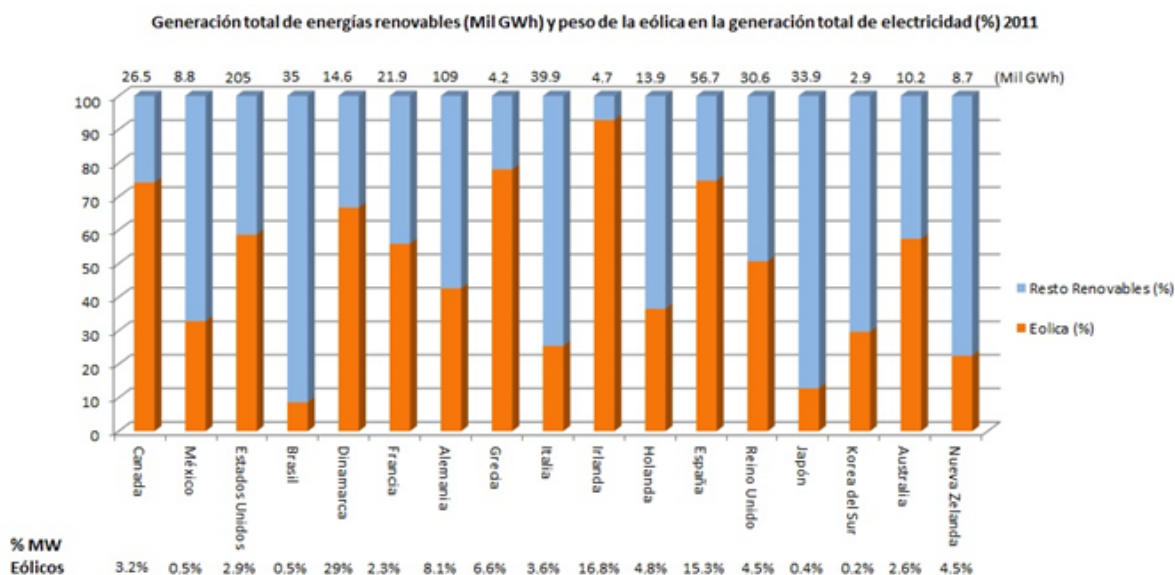
A lo largo de la historia el ser humano siempre ha buscado muchas formas de generar energía eléctrica para satisfacer sus necesidades, entre las formas de generar energía eléctrica son las centrales termoeléctricas, centrales geotérmicas, centrales fotovoltaicas, centrales nucleares, centrales eólicas. Este trabajo se concentra en el último caso.

En años recientes diversas organizaciones han promovido la generación de energía eléctrica segura, limpia y económica. La energía nuclear es una forma muy económica de generar electricidad pero cualquier accidente en una planta nuclear, esta puede ser muy contraproducente para la ecológica y el ser humano. Por ejemplo están los accidentes de Chernobyl y Fukushima. Las centrales fotovoltaicas en principio son una forma muy segura e inagotable de generar energía eléctrica, esto porque la celda solar transforma la energía solar en energía eléctrica. Esta forma de generar energía eléctrica tiene problemas en la eficiencia por que la celda solar solo puede transformar a los más un 20 % en energía eléctrica. Actualmente se producen muchos tipos de celdas solares para mejorar la eficiencia para transformar la energía pero esta tiene el problema de la contaminación, por los compuestos químicos empleados.

Las centrales eólicas por su parte generan energía eléctrica a través del viento, estas no producen desechos tóxicos, además no contribuyen al calentamiento global. La generación de electricidad mediante centrales eólicas es altamente competitiva debido a que estas no dependen del precio del petróleo o gas. La energía eólica se presenta

como la más vendida en el ámbito internacional por potencia instalada y por energía generada, debido a que es una medida óptima de reducir gases de efecto invernadero.

Entre los beneficios de generar energía con centrales eólicas son varias, actualmente es la fuente renovable más competitiva. A pesar sus altos costos de inversión, los costos de operación son muy bajos comparados con tecnologías convencionales. Dado que no generan emisiones de efecto invernadero, también se tiene beneficios ambientales para la sociedad. Además, las instalaciones producen un ingreso adicional en las zonas rurales del país, sin afectar las actividades agrícolas y ganaderas.



En el contexto internacional muchos países desarrollan centrales eólicas a escala comercial. A nivel mundial se tienen las siguientes datos representativos

- China es el país asiático con mayor producción de energía eólica en el mundo, con una producción anual de 45 GW.

- Estados Unidos es el segundo mayor productor con 43 GW.
- Alemania tiene una capacidad de 28 GW.

México cuenta con altos potenciales de generación de energía eólica en el mundo. De acuerdo con el nacional 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 GW (en 2013 genero aproximadamente 2.4 GW).

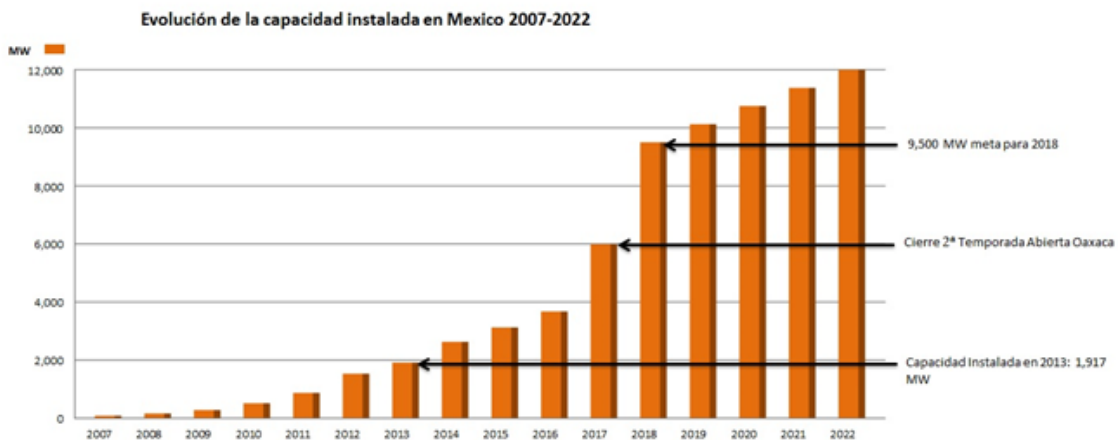


Figura 1.1: Evolución de la capacidad de generación de energía eólica en México.

Las regiones de México que tienen altos recursos eólicos son: Oaxaca, Baja California, Nuevo León, Coahuila, Jalisco, etc. México puede seguir los pasos de Dinamarca y España, estos países obtienen el 20% de su energía con centrales eólicas.

En particular la región del istmo de Tehuantepec presenta velocidades de viento ideales para generación de entre 5000 y 7000 MW de capacidad anual. El enorme potencial del istmo de Tehuantepec se debe a la potencia del viento, que excede los 1200 watts por metro cuadrado entre octubre y febrero.

Desde el 2012 se tienen en proceso de construcción varias centrales eólicas. Entre ellos están Enel Green Power (EGP) para una capacidad de 70 MWH, Iberdrola construirá una central eólica con una capacidad de 103 MWH, Gas Natural Fenosa construirá una central con una capacidad aproximada de 240 MWH, Infraestructura Energética Nova (IEnova) tiene la construcción del Parque Eólico en Baja California con capacidad para generar 156 MW. Pero aún se cuenta con un potencial adicional de 40 GW por utilizar.

En México la ley permite la producción de energía eléctrica por parte de productores independientes para su consumo o para poder venderla a CFE, CFE es la única empresa permitida para vender energía a los consumidores finales.

Modelo de Valor presente neto

En este capítulo se realiza una breve resumen sobre la teoría que será empleada para encontrar el valor presente de un proyecto. Principalmente se hace una revisión sobre mallas binomiales, el modelo de Ho-Lee.

2.1. Introducción

El valor presente nos permite conocer el poder de compra equivalente hoy a una serie de flujos de efectivo. El valor presente de un futuro monetario es menor que el valor nominal de esa cantidad. El factor al cual debe descontarse se conoce como factor de descuento. Entonces tendremos que la ecuación del valor presente depende tanto de los flujos como de la tasa de interés a la cual los flujos serán descontados.

Para incorporar incertidumbre se emplea la herramienta de mallas binomiales que conectan estados posibles en tiempo futuros, los arcos de la malla establecerán los posibles caminos entre los estados.

Ahora sea $r_{k,s}$ la tasa de interés corta en el tiempo k en el estado s y sea X_k el flujo

de efectivo en el periodo k . Entonces se define el valor presente de la siguiente forma

$$VP = X_0 + \sum_{i=1}^{i=7} \frac{X_i}{\prod_{k \leq i} (1 + r_{k,j})} + \frac{\sum_i \frac{A}{(1+r)^i}}{\prod_{k=0}^{k=7} (1 + r_{k,j})}, \quad (2.1)$$

donde $\sum_i \frac{A}{(1+r)^i}$ representa una perpetuidad a partir del año 8, es decir, se asumen flujos constantes a partir de ese año. En este caso en particular, como se trata de un proyecto que involucra maquinas que tienen una vida de año útil, en base en información encontrada ¹, se tiene que las turbinas de una planta eólica tienen una vida útil de 25 años. Donde A representan flujos de efectivo constante a lo largo del tiempo y r es el factor de descuento (tasa corta). Los últimos flujos son constantes, por que en los años finales estos valores ya no influyen drásticamente en el valor presente del proyecto.

2.2. Estructura de tasa de interés

El valor presente de un proyecto depende ampliamente de la tasa de interés a la cual son descontados los flujos de efectivo a lo largo del tiempo. El mercado de tasa de interés es muy complejo, es por esto que es necesario introducir una estructura amplia y completa de la tasa de interés, esto con la finalidad de introducir incertidumbre.

En la figura 2.1 se muestra la malla binomial, una herramienta fundamental que nos permite un marco de trabajo para la construcción de modelos de la tasa de interés. El tiempo entre nodos representa un periodo, que puede ser semanal, mensual, anual, etc.

¹The european wind energy association

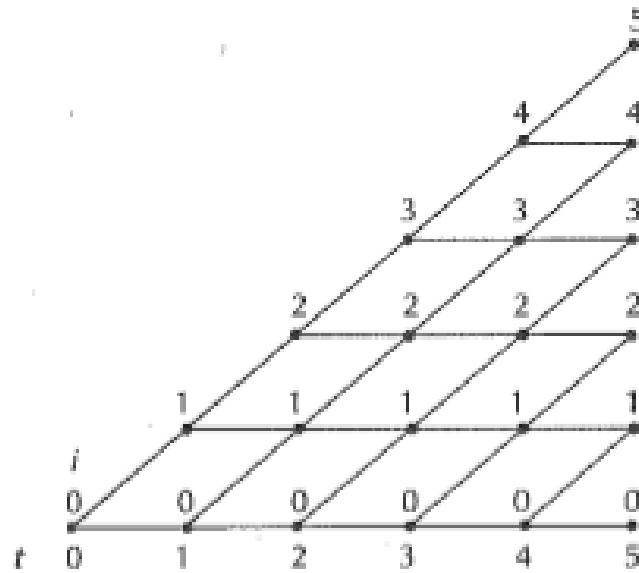


Figura 2.1: Representación gráfica de una estructura de malla binomial.

A cada nodo se le asigna una tasa corta que será la tasa vigente durante un periodo si llegamos a ese estado, cada estado tiene dos posibles estados para el próximo periodo, subir o bajar de nivel. Existen diversos modelos para obtener la estructura de malla binomial, tal como el modelo de Ho Lee, Black-Derman-Toy, etc. En este trabajo se emplea el modelo de Ho Lee, aún que el modelo de Black-Derman-Toy es una alternativa, este modelo se puede ver como el modelo de Ho-Lee aplicado a $\ln(r_{k,s})$, ambos métodos son muy similares.

2.3. Enfoque binomial

Los inversionistas toman en cuenta los movimientos de las tasas de interés como una forma de considerar los riesgos. El modelo de malla binomial² proporciona un marco de trabajo adecuado para la incorporación de incertidumbre en la tasa de interés. A partir de la figura 2.2 se asume que la diferencia entre nodos consecutivos es igual a un periodo, que puede ser semanal, mensual, anual, etc. Ahora a cada nodo asignamos una tasa corta. La evaluación recursiva en un modelo de malla binomial es frecuentemente utilizado en la evaluación de instrumentos financieros.

El punto de partida del modelo de Ho Lee son los precios elementales, en este caso se emplea el método de recursión hacia adelante. Para cada nodo se asigna el precio $P_{(k,s)}$, donde k y s denotan el tiempo y estado respectivamente. $P_0(k, s)$ es el precio elemental

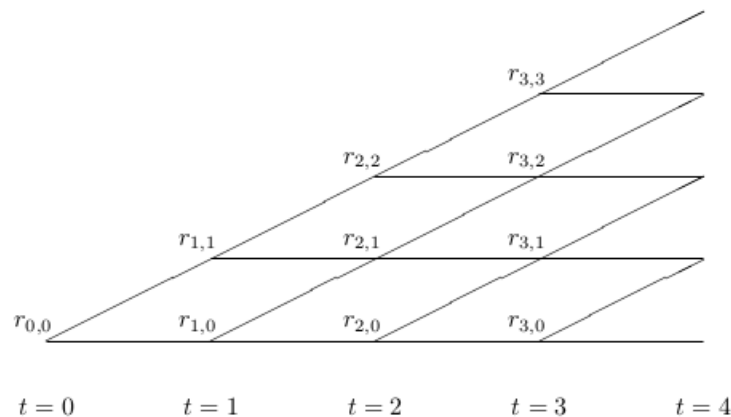


Figura 2.2: A cada nodo de la gráfica se le asigna una tasa de interés y un precio

²Cabe mencionar que existe el modelo de malla trinomial, la base de ambos modelos es la misma, pero en este caso se contempla 3 casos posibles en vez de 2.

que paga una unidad en el tiempo k en el estado s . En general existen 3 ecuaciones “forward”, esto dependiendo de donde se encuentre el nodo en la estructura de malla binomial

$$P(k+1, s) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{P(k, s-1)}{1 + r(k, s-1)} + \frac{P(k, s)}{1 + r(k, s)} \right\} \quad 0 < s < k+1 \quad (2.2)$$

$$P(k+1, 0) = \frac{1}{2} \frac{P(k, 0)}{1 + r(k, 0)} \quad s = 0 \quad (2.3)$$

$$P(k+1, k+1) = \frac{1}{2} \frac{P(k, k)}{1 + r(k, k)} \quad s = k+1 \quad (2.4)$$

2.4. Modelo de Ho Lee

De la figura 2.2, se define el nodo $r_{k,s}$, donde k es el tiempo y s el estado en el tiempo k . Entonces un método simple de establecer la tasa de interés es de la forma

$$r_{k,s} = a_k + sb_k, \quad (2.5)$$

el nombre este modelo deriva de los autores Thomas Ho y Sang Bin Lee. En este modelo a_k y b_k son parámetros. La variación entre los nodos en cualquier tiempo se determina por el factor b_k . El factor b_k es conocido como el parámetro de volatilidad. El modelo de Ho-Lee base presupone que b_k es constante, en este caso solo se selecciona los factores a_k 's.

2.5. Modelo de malla binomial

En esta sección se muestra como se puede modelar las fluctuaciones en los precios de manera realista. Dos modelos que pueden ser empleados son el modelo de malla binomial y el proceso de Ito. Ambos modelos sirven para representar la dinámica de activos. El modelo de malla binomial es analíticamente mas sencillo que los procesos de Ito, además proporciona un marco de trabajo idóneo para inversiones. Los conceptos relevantes de inversión pueden ser resueltos utilizando mallas binomiales.

En este caso se toma un año como un periodo. El precio S es conocido en el inicio y se tienen dos posibilidades para el siguiente periodo, que el precio suba Su o que el precio baje Sd , donde $u > 1$ y $d < 1$, tal como lo muestra la siguiente figura. Se asigna probabilidades para cada caso, p y $1 - p$, respectivamente. En resumen se tiene que si el precio hoy es S , con probabilidad p el precio en el siguiente periodo es Su y Sd con probabilidad $1 - p$, así sucesivamente para los siguientes periodos.

Ahora se obtiene el valor esperado del precio en el tiempo T

$$E[S_T] = p(Su) + (1 - p)Sd \tag{2.6}$$

$$= pS(u - d) + Sd. \tag{2.7}$$

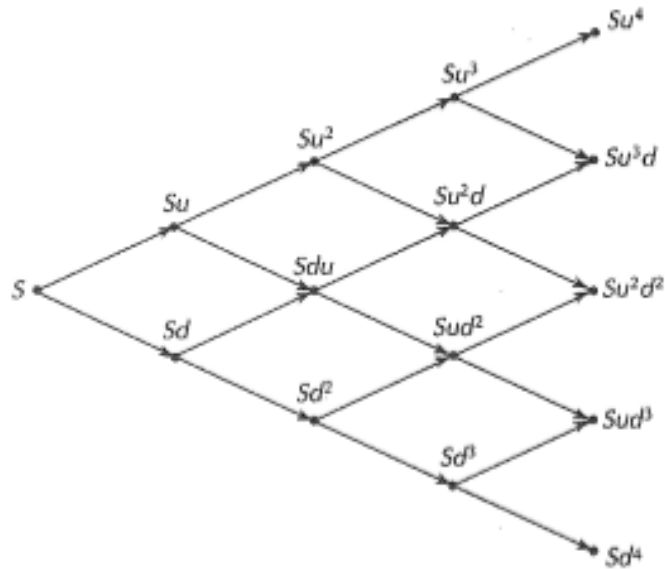


Figura 2.3: Representación de una malla binomial, donde el precio S , puede subir Su o bajar Sd en el próximo periodo

Empleando³ ahora que $p = (e^{rT} - d)/(u - d)$, se obtiene que

$$E[S_T] = Se^{rT}, \quad (2.8)$$

por otro lado, la varianza del precio es

$$\sigma^2 \Delta t = pu^2 + (1 - p)d^2 - (pu + (1 - p)d)^2 \quad (2.9)$$

³Revisar [4, 5]

empleando las ecuaciones anteriores, se obtiene que

$$\sigma^2 \Delta t = e^{r\Delta t}(u + d) - ud - e^{2r\Delta t}, \quad (2.10)$$

expandiendo la función exponencial, finalmente se encuentra que

$$d = e^{-\sigma(\Delta t)^{0,5}} \quad (2.11)$$

$$u = e^{\sigma(\Delta t)^{0,5}} \quad (2.12)$$

Análisis de información

En este capítulo se realiza un análisis del valor presente que puede llegar a tener la inversión en una central eólica en México¹, esto considerando incertidumbre en la tasa de interés, el precio que paga CFE, nivel de generación de energía y costo de inversión. El estudio que se realiza se basa en información obtenida a través de CFE, la auditoría superior de la federación y “The european wind energy association”.

3.1. Modelo Ho lee

En esta sección se presentan los datos que serán empleados para construir la malla binomial de las tasas de interés. El punto de partida es la estructura de tasa spot actual.

La curva de tasa spot se puede obtener a través de un modelo parsimonioso propuesto por Nelson y Siegel, este modelo es muy empleado en el mercado por tratarse de un modelo muy simple pero capaz de generar diversas curvas de rendimiento. El modelo propuesto por estos autores puede recrear un gran número de curvas de rendimiento. El

¹En México la ley permite la generación de energía eléctrica para venderla a CFE, en la modalidad de Productores independientes de energía (PIE)

resultado que obtiene el modelo se debe a que contempla tres componentes principales: al corto plazo, mediano y largo plazo. Así entonces con la información que prevalece en el mercado podemos obtener la curva de rendimiento para diversos periodos de vencimiento. En la siguiente tabla se muestra la tasa spot²³ para los siguientes años:

Periodo	tasa spot
2015-2016	3.75
2015-2017	4.46
2015-2018	5.12
2015-2019	5.73
2015-2020	6.30
2015-2021	6.82
2015-2022	7.32
2015-2023	7.78

Cuadro 3.1: Tasa spot para los siguientes 8 años

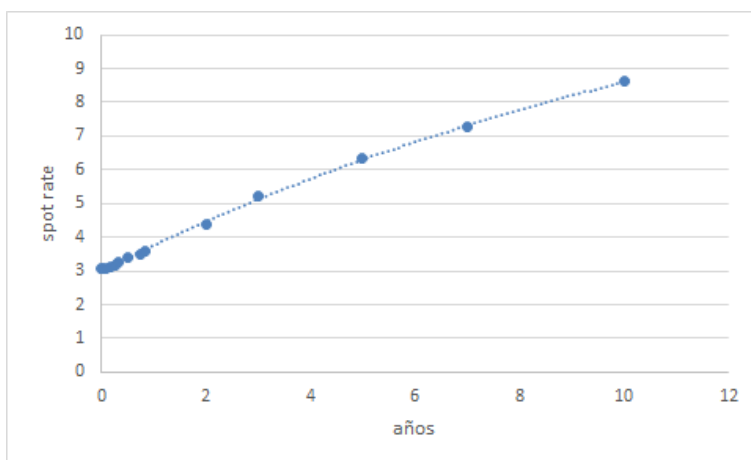


Figura 3.1: Curva de tasa spot

²Información proporcionado por el M. Raúl Anival Feliz. La curva de tasa spot se puede obtener a través de un modelo de Nelson Siegel, ver apéndice.

³Curva de tasa spot al día 10 de marzo de 2015

Para obtener la estructura de tasa de interés se emplea Excel, con el paquete *solver* podemos encontrar la estructura de la malla binomial para la tasa de interés. El parámetro de volatilidad empleado es 0.01 por año, el cual mide que la tasa corta probablemente fluctuó cerca de 1 % durante un año. Así entonces con la formula (2.5) se construye la tasa corta para todos los periodos en los diferentes estados.

Por otro lado para la construcción de los precios elementales se emplean las formulas (2.2), (2.3) y (2.4). Ahora los precios elementales se suman por columnas para los diferentes años, con esto se obtiene el precio de un bono cupón cero. A partir de estos precios se obtiene la tasa forward que prevalece entre cada año. Para recuperar la tasa spot se emplea la siguiente fórmula:

$$F_{i,j} = \frac{S_j * j - S_i * i}{j - i} \quad i \leq j, \quad (3.1)$$

donde $F_{i,j}$ es la tasa forward para el periodo i a j y S_k es la tasa spot para el periodo k . A partir de la segunda tasa spot, se minimizará el error de la diferencia de las tasas spot variando las variables a_k .

En la siguiente tabla se muestra la estructura de malla binomial para las tasas cortas que serán empleadas para calcular el valor presente.

año	0	1	2	3	4	5	6	7	
tasa spot	3.57	4.4	5.23	5.73	6.33	6.82	7.26	7.78	
a_k	3.56	5.22	6.87	7.21	8.70	9.24	9.87	11.38	
Estado									
7									11.45
6		tasa							9.93 11.44
5		corta							9.29 9.92 11.43
4					8.74	9.28	9.91	11.42	
3				7.24	8.73	9.27	9.90	11.41	
2			6.89	7.23	8.72	9.26	9.89	11.40	
1		5.23	6.88	7.22	8.71	9.25	9.88	11.39	
0	3.56	5.22	6.87	7.21	8.70	9.24	9.87	11.38	
8									0.002
7								0.004	0.017
6							0.010	0.033	0.060
5						0.022	0.063	0.100	0.120
4					0.050	0.115	0.157	0.167	0.150
3				0.107	0.200	0.230	0.210	0.167	0.120
2			0.229	0.321	0.300	0.230	0.157	0.100	0.060
1		0.482	0.458	0.321	0.200	0.115	0.063	0.033	0.017
0	1	0.482	0.229	0.107	0.050	0.023	0.010	0.004	0.002
Precio	1	0.965	0.917	0.858	0.800	0.736	0.673	0.613	0.550
Forward		3.569	5.230	6.889	7.230	8.729	9.270	9.900	11.419
Spot rate		3.569	4.399	5.229	5.730	6.329	6.819	7.260	7.779

Cuadro 3.2: La tabla muestra la estructura de tasa de interés que se empleara posteriormente.

3.2. Precio de la energía

En México la ley permite la generación de energía eléctrica tanto para consumo propio como para venderla a la CFE, en la modalidad de productor independiente de energía. Además se pueden llevar acabo proyectos conjuntos con la CFE.

Los precios que paga la Comisión Federal de Electricidad a los productores de energía

varían conforme a la capacidad de producción de la planta eléctrica, la energía entregada durante un periodo (un mes), forma en que es generado la energía eléctrica, entre otros factores. En la siguiente tabla se muestra el precio promedio (\$/kWh) de la energía eléctrica que ha pagado CFE a los productores independientes de energía (PIE). Los precios son base al año 2014⁴.

año	precio(\$/kWh)
2000	0.489
2001	0.282
2002	0.297
2003	0.501
2004	0.544
2005	0.838
2006	0.701
2007	0.71
2008	0.943
2009	-
2010	0.629
2011	-
2012	0.52
2013	0.7
media	0.786
σ	0.240

Cuadro 3.3: La siguiente tabla muestra el precio promedio de la energía eléctrica que paga CFE a los PIE.

Con la información anterior, se toma el precio promedio de la energía eléctrica para este año, y empleando la ecuaciones (2.11) y (2.12) se puede calcular la posible variación en el precio de la energía eléctrica para los siguientes periodos. Así se muestra

⁴Los datos fueron obtenidos a través de la pagina de la Auditoría Superior de la Federación, www.asf.gob.mx. Para el caso del año 2009 y 2011 no se encontró información. La información del año 2014 se publicara en Febrero 2015.

a continuación la estructura de malla binomial para los precios que paga CFE a los PIE.

Estado	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
7								4.2472
6							3.3378	2.6232
5						2.6232	2.0615	1.6201
4					2.0615	1.6201	1.2732	1.0006
3				1.6201	1.2732	1.0006	0.7863	0.6180
2			1.2732	1.0006	0.7863	0.6180	0.4856	0.3816
1		1.0006	0.7863	0.6180	0.4856	0.3816	0.2999	0.2357
0	0.7863	0.6180	0.4856	0.3816	0.2999	0.2357	0.1852	0.1455

Cuadro 3.4: Estructura de malla de precios

3.3. Inversión y capacidad de producción

Antes de calcular el valor presente neto, primero se muestra información sobre el costo de instalación de una central eólica. La construcción de una central eólica puede tomar un año, y el costo de construcción varía entre 1740 – 2000 Dolares⁵/KW según “The european wind energy association”. En el costo de construcción se contemplan los siguientes rubros: compra de aerogenerador, conexión a la red, obra civil, desarrollo y gestión de la construcción.

La mayor parte de la inversión en una central eólica se concentra en la turbina eólica, entonces las fluctuaciones del costo del combustible no afectan los costos de generación, por lo tanto, una turbina eólica representa un capital importante comparado con las tecnologías convencionales de combustibles fósiles, donde entre 40 y 70 % de los costos

⁵Se emplea un tipo de cambio promedio de 14.5 \$/*Dolar Americano*

están relacionados con el combustible, costos de operación y mantenimiento. Ningún precio futuro del carbón, petróleo o gas afectara el costo de la producción de la energía eólica, solo se necesita hacer predicciones sobre el desarrollo futuro y la capacidad instalada.

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 Reino Unido, España y Alemania son de 20 a 30 % mayores que los de Dinamarca. El costo anterior puede ser aplicado al caso de México por que las turbinas eólicas son fabricadas en Europa, principalmente por empresas españolas.

En el costo de mantenimiento anual, que contemplan rubros de administración, seguridad y mantenimiento, se ha estimado en \$ 800 mil anuales, además se considera una inflación del mantenimiento de 4% anual.

En el proyecto se contempla una planta eólica con un capacidad de 500 MW. Debido a que existen temporadas cuando el viento tiene una mayor potencia, entonces consideramos 2 estados posibles para la capacidad de producción. Con base en la información de la central eólica La venta, se considerará que operaremos a 70 % o 95 % de la capacidad de producción⁶.

Para la estimación de la anualidad a partir del año 2014 se emplea una capacidad de producción constante, el precio promedio del año 2014 y un costo de mantenimiento de promedio del último año. Entonces se calcula la anualidad entre el año 2023 y hasta

⁶Información obtenida a través del instituto federal de acceso a la información y protección de datos (IFAI), número de folio 1816400032015

2031⁷.

3.4. Valor presente neto

Con la información previa se puede ver que el cálculo del valor presente neto no del es todo difícil, pero con la incorporación de las incertidumbres, se necesitan calcular más de 65,000, sin embargo con ayuda de software se puede hacer rápido este cálculo.

Para obtener todos los valores presentes, se realizó un programa en matlab (o también se puede emplear Excel), el cual contempla todos los estados posibles para la malla de precios y la malla de la tasa de interés. Así como los dos estados posibles en la producción y en la inversión. A partir de todas las combinaciones se calcularán 65,536 valores presentes netos. Con esa información podremos tanto obtener su distribución, como analizar que porcentaje serán negativos, es decir, no atractivos como inversión.

3.5. Resultado

En la siguiente se gráfica se puede ver que la distribución del valor presente, esto solo para dos posibles estados en la producción, con un 70 y 95 % de capacidad. La media es de $6,6740e09$.

⁷Las turbinas eólicas tiene una vida útil de 25 años.

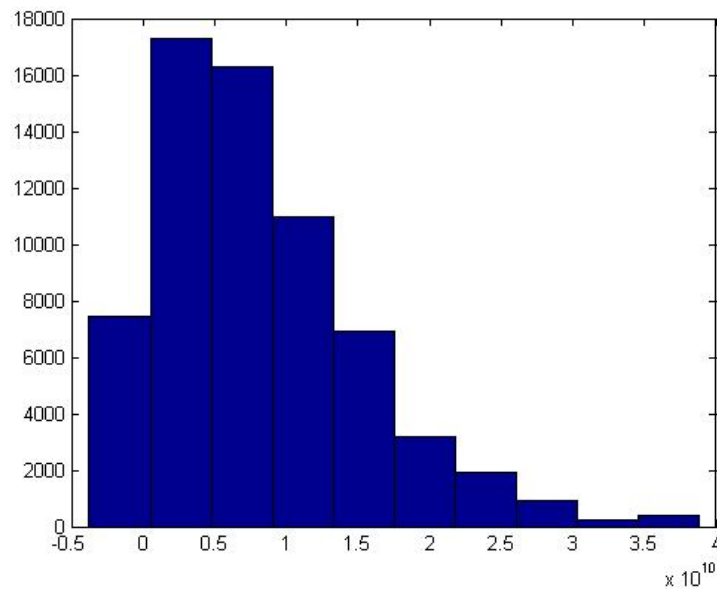


Figura 3.2: Distribución del Valor Presente Neto

De la figura (3.2) se puede observar que existe un gran riesgo de pérdida en muchos casos, 5888 de 65536 casos (9%) para el cual el valor presente neto es negativo. Es decir bajo esas condiciones el proyecto no sería atractivo para un inversionista. Este problema se puede solucionar con la incorporación de un seguro.

Para la incorporación del seguro primero necesitamos saber que variable afecta más al valor presente neto, esto se puede saber mediante un análisis de sensibilidad del valor presente con la tasa de interés, el precio de la energía y el nivel de generación de energía eléctrica. Para esto ocuparemos la herramienta llamado tornado, con este mecanismo podremos medir la sensibilidad del valor presente neto.

Como cada variable tiene diferente incertidumbre, entonces se aplicara el método de tornado al valor presente con diferente incertidumbre para cada variable. Se toma el

caso particular de un valor presente, con precio promedio y tasa promedio.

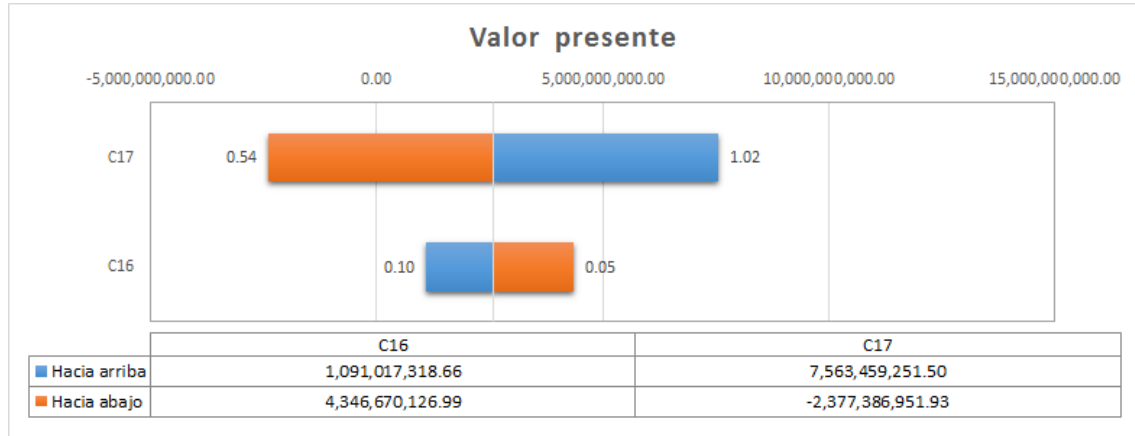


Figura 3.3: Sensibilidad del valor presente neto ante los precios(c17) y la tasa de interés(c16)

De la gráfica 3.3 se puede observar que el valor presente neto es más sensible ante cambios en el precio que la tasa de interés. Así también notese que el VPN incrementa ante aumentos en el precio y cuando la tasa de interés baja. Del mismo modo baja cuando el precio cae y la tasa de interés aumenta.

Entonces con el resultado anterior podemos implementar un seguro asociado aun nivel más bajo al precio para el cual el valor presente no sea negativo, es decir, pagar una cierta cantidad para mantener un nivel en el precio más bajo al cual el proyecto aún es factible (obtener valor presente neto positivos).

Con ayuda del programa en matlab, se puede encontrar que el nivel mas bajo del precio que genera $VPN > 0$ es $0,618010204\$/kW$, es decir, que la estructura de malla de precios de la forma que muestra la tabla (3.5)

Con la estructura de malla de precios anterior se puede encontrar que la distribución

Estado	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
7								4.2472
6							3.3378	2.6232
5						2.6232	2.0615	1.6201
4					2.0615	1.6201	1.2732	1.0006
3				1.6201	1.2732	1.0006	0.7863	0.6180
2			1.2732	1.0006	0.7863	0.6180	0.6180	0.6180
1		1.0006	0.7863	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180
0	0.7863	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180	0.6180

Cuadro 3.5: Estructura de malla de precios

del valor presente neto es positiva.

Así con la estructura de malla de tasa de interés utilizada anteriormente, con los dos posibles estados en la producción e inversión, y con la nueva estructura de malla binomial para el precio, se obtiene la siguiente distribución del valor presente neto

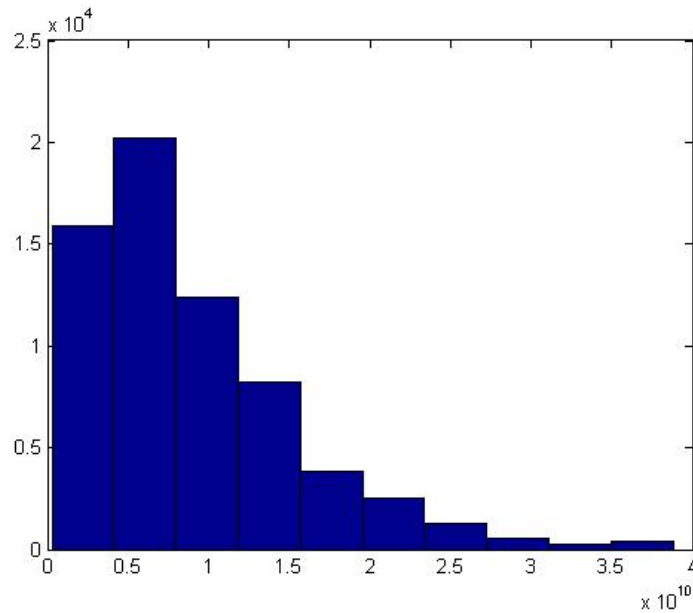


Figura 3.4: Distribución del valor presente neto

En donde se puede notar que en la distribución todos los valores netos son positivos

(adicionalmente se verifico primero con el programa), es decir que el nivel más bajo para el precio es 0,6180\$/kW para el cual todos los valores presente son positivos.

El resultado encontrado nos indica que el precio de la energía eléctrica no debe bajar más de 0.6180 en todos los años, para que el proyecto sea atractivo como inversión.

Entonces con el nivel de precio encontrado se puede determinar el costo del seguro con ayuda de un put americano. El put americano [5] nos asegura de una posible caída en los precios de la energía en cualquier año.

En particular se presenta el put americano de una trayectoria en particular para la tasa de interés

								<u>4.247299204</u>
								0
								3.337899104
								0
								2.623212987
								0
								2.061550142
								0
								1.620146366
								0
								1.273252682
								0
								1.273252682
								0
								0.001765804
								1.000633293
								1.000633293
								1.000633293
								1.000633293
								0
								0.786385138
								0
								0.022640419
								0.009706767
								0.786385138
								0
								0.013673416
								0.786385138
								0
								0.618010204
								0.618010204
								0.618010204
								0
								0.041564449
								0.485686458
								0
								0.132323746
								0.132323746
								0.381694888
								0.381694888
								0.381694888
								0
								0.236315316
								0.236315316
								0.236315316
								0
								0.318040985
								0.318040985
								0.299969219
								0.299969219
								0.299969219
								0
								0.235742042
								0.235742042
								0.235742042
								0
								0.382268162
								0.382268162
								0.382268162
								0
								0.318040985
								0.318040985
								0.18526671
								0.18526671
								0.18526671
								0
								0.432743494
								0.432743494
								0.145598781
								0.145598781
								0.472411423
								0.472411423

Cuadro 3.6: Put americano para una trayectoria en particular en la tasa de interés

En este caso el costo del put americano es 0,032160746 \$/KW, el valor de la prima será el valor del put americano por el nivel de producción estimada, en este camino en

particular el valor de prima es de \$140864067,8. Como todas las trayectorias tienen distintas tasas de interés, entonces el factor de descuento es distinto para cada trayectoria, es decir, el valor del put americano cambia de acuerdo al camino de la tasa de interés. Entonces para conocer el valor presente neto hay que descontar el valor de la prima del put americano y obtener un $VPN > 0$. Este cálculo se puede incorporar al programa de matlab. Ahora como comparativo, el valor medio del valor presente neto es de \$ 8.7166e+09, el valor máximo es \$ 3.8690e+10 y el valor mínimo es de \$ 1.8182e+08.

Finalmente de la figura (3.5) se muestra el valor presente neto descontado el valor de la opción de la opción

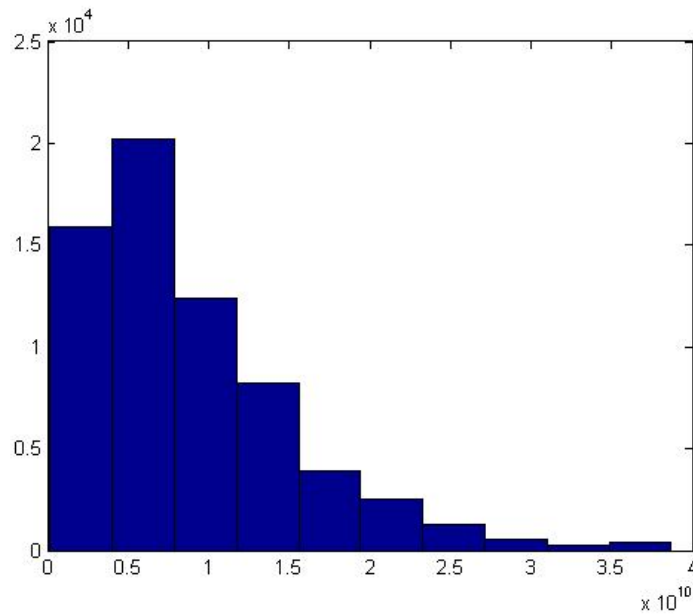


Figura 3.5: Distribución del valor presente neto descontado el valor de la prima del seguro

Conclusiones

El análisis del valor presente neto ha sido empleado a lo largo del tiempo por los analistas, donde identifican las incertidumbres y construyen arboles de decisión. Existen diversos enfoques para realizar este tipo de estudios.

En el presente trabajo de tesina se empleo la técnica de flujo descontado para valuar la construcción de una central eléctrica, en particular de una central eólica en México. Las principales incertidumbres del proyecto son el precio que paga comisión federal de electricidad (CFE) a los productores independientes de energía (PIE), la tasa de descuento, la inversión y la generación de energía.

Para la modelación de la incertidumbre de la tasa de interés se empleo la herramienta de malla binomial, con ayuda del modelo de Ho-Lee. Para los posibles precios en los siguientes periodos se construyo una malla binomial, empleando información de CFE y la auditoría superior de la federación. Cabe mencionar que las maquinas tienen años de vida útil, en este caso es de 25 años, pero las mallas son por un periodo de 7 años debido a que los primeros flujos son los que más influyen en el valor presente neto.

Finalmente se consideraron dos estados posibles para el nivel de producción y el

costo de inversión, en base a información obtenida por la CFE y la Auditoría Superior de la Federación. Como no existen restricciones del valor presente neto, esta puede ser negativa, en este trabajo se encontró varios casos donde es negativo (3%), es decir, que el proyecto no es viable en varios casos.

Sin embargo aún se le puede dar más certidumbre al inversionista de que el proyecto es viable, esto mediante un seguro para cubrir las posibles pérdidas. Esto se puede realizar para cubrir un nivel más bajo en el precio o la tasa de interés. Para esto es necesario saber la sensibilidad del valor presente neto ante las incertidumbres. Este análisis se conoce como tornado. En este proyecto en particular se encuentra que el valor presente neto es más sensible al precio que a las otras incertidumbres.

Entonces finalmente se encuentra cual podría ser el nivel del precio más bajo y para calcular el valor de la prima del seguro se emplea un put americano. El put americano paga cuando el valor de la energía cae por debajo de $0,4556\$/KW$, finalmente se descuenta el valor de la opción al valor presente neto. Lo cual representa que es factible la generación de energía mediante fuentes renovables, es decir, que es altamente competitivo con otras fuentes de generación de energía.

México tiene un potencial de 40 GW para generar energía con fuente eólica que representa aproximadamente el 16% de lo que actualmente se consume en México.

Para futuros trabajos una cuestión importante por resolver es comparar el precio que se obtuvo con el precio que ofrece CFE a los PIE en contratos de largo plazo, y poder saber si existe algún tipo de pérdida por la diferencia del precio.

Capítulo A

Modelo Nelson-Siegel

Uno de los modelos más importantes para crear la curva de rendimiento fue propuesto por Nelson y Siegel (1987). A partir de los datos observados se puede crear la curva de rendimientos. El modelo propuesto es simple, parsimonioso que es flexible para recrear la amplia gama de curva de rendimientos. El estudio de la estructura de vencimiento de la tasa de interés han descrito curvas de rendimientos que son monótona, con forma de s o jorobas. Una clase de funciones que genera la forma de curva de rendimientos típicas son las soluciones a las ecuaciones diferenciales o en diferencia.

Si la tasa forward instantánea con rendimiento en m esta dada por la solución a una ecuación diferencial de segundo orden

$$r(m) = \beta_0 + \beta_1 e^{-\frac{m}{\tau_1}} + \beta_2 e^{-\frac{m}{\tau_2}} \quad (\text{A.1})$$

donde τ_1 y τ_2 son constantes asociadas con la ecuación, β_i son determinadas por las condiciones iniciales. La ecuación anterior genera una familia de curvas forward. La

curva de rendimiento $R(m)$ es el promedio de las tasas forward

$$R(m) = \frac{1}{m} \int_0^m r(x) dx \quad (\text{A.2})$$

Para obtener la curva de rendimiento como una función de la maduración, se sustituye (A.1) en (A.2), así entonces se obtiene el siguiente resultado

$$R(m) = \beta_0 + \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{m/\tau} \left[1 - e^{-\frac{m}{\tau}} \right] - \beta_2 e^{-\frac{m}{\tau}} \quad (\text{A.3})$$

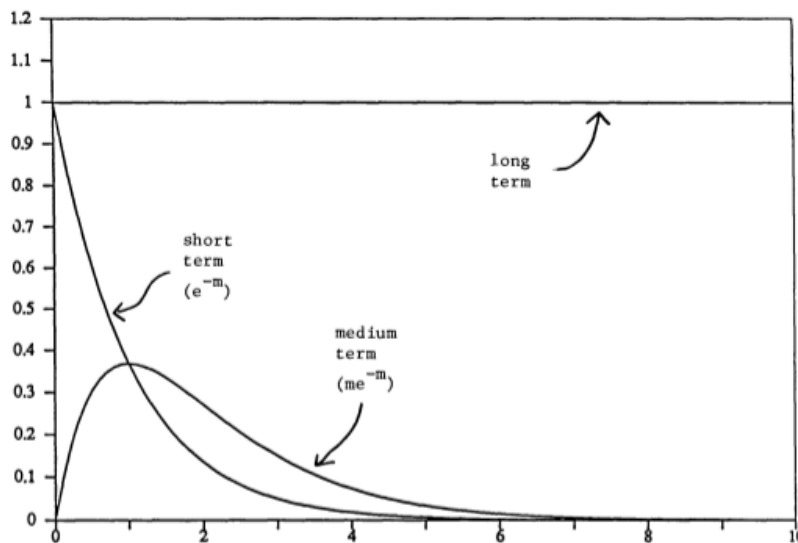


Figura A.1: Componentes de la curva de tasa forward.

Una forma de interpretar la curva de tasa forward es mediante tres componentes: corto, mediano y largo plazo. La contribución en el largo plazo es el factor β_0 , la compo-

nente de corto plazo es β_1 y β_2 indica la componente de mediano plazo. En la siguiente figura se puede observar que la componente de largo plazo es una constante. La curva del termino de mediano plazo es una función que empieza en cero y decae a cero. La curva de termino de corto plazo es una función que decae rápidamente a cero (es monotónica). Finalmente con una combinación adecuada de las tres funciones (componentes) se puede generar una gran variedad de curvas de rendimientos.

Capítulo B

Código Matlab

Para el calculo del valor presente se emplea el siguiente código en **matlab**

```
i=1;
A=zeros(65536,18);
Li=1;
Lk=1;
contador=1;
precero=0.786385138;
precio=[ 0.618010204 0.485686458 0.381694888 0.299969219 0.235742042 0.18526671
0.145598781; 1.000633293 0.786385138 0.618010204 0.485686458 0.381694888
0.299969219 0.235742042 ;0 1.273252682 1.000633293 0.786385138 0.618010204
0.485686458 0.381694888 ;0 0 1.620146366 1.273252682 1.000633293 0.786385138
0.618010204 ;0 0 0 2.061550142 1.620146366 1.273252682 1.000633293 ;0 0 0
0 2.623212987 2.061550142 1.620146366 ;0 0 0 0 0 3.337899104 2.623212987;
0 0 0 0 0 0 4.247299204]
tasa=xlsread('C:\Users\john\Documents\trabajosmatlab\tesina
\tasamalla.xlsx','TESINA','N15:T22');
tasacero=xlsread('C:\Users\john\Documents\trabajosmatlab\tesina
\tasamalla.xlsx','TESINA','M15:M15');
costo=[1200000;1248000;1297920;1349839;1403830;1459983;1518382;
1579118;1642282];
inversion=[1.3485e10,1.55e10];
k=[0.60*4.38e9;0.90*4.38e9];
k3=0.75*4.38e9;
flujo=k3*precero-costo(9);
vp=((flujo/0,03) * (1,0317 - 1))/(1,0317);
while Lk<=2
while Li<=2
s=0; r=0; m=0; p=0; q=0; l=0; e=0; a=0; b=0; c=0; d=0; f=0; g=0; h=0;
```

```
while s<=1
r=s;
if s<=2
while (s==r | r==s+1)
m=r;
if m<=3
while (m==r | m==r+1)
p=m;
if p<=4
while(m==p | p==m+1)
q=p;
if q<=5
while (q==p | q==p+1)
l=q;
if l<=6
while (l==q | l==q+1)
e=l;
if e<=7
while (e==l | e==l+1)
a=0;
while a<=1
b=a;
if b<=2
while (b==a | b==a+1)
c=b;
if c<=3
while (b==c | c==b+1)
d=c;
if d<=4
while (d==c | d==c+1)
f=d;
if f<=5
while (f==d | f==d+1)
g=f;
if g<=6
while (g==f | g==f+1)
h=g;
if h<=7
while (h==g | h==g+1)
d0=1/(1+(tasacero/100));
d1=d0/(1+(tasa(a+1,1)/100));
```

```

d2=d1/(1+(tasa(b+1,2)/100));
d3=d2/(1+(tasa(c+1,3)/100));
d4=d3/(1+(tasa(d+1,4)/100));
d5=d4/(1+(tasa(f+1,5)/100));
d6=d5/(1+(tasa(g+1,6)/100));
d7=d6/(1+(tasa(h+1,7)/100));
d8=d7/(1.11);
f1=(k(Lk)*precero-costo(1))*d0;
f2=(k(Lk)*precio(s+1,1)-costo(2))*d1;
f3=(k(Lk)*precio(r+1,2)-costo(3))*d2;
f4=(k(Lk)*precio(m+1,3)-costo(4))*d3;
f5=(k(Lk)*precio(p+1,4)-costo(5))*d4;
f6=(k(Lk)*precio(q+1,5)-costo(6))*d5;
f7=(k(Lk)*precio(l+1,6)-costo(7))*d6;
f8=(k(Lk)*precio(l+1,7)-costo(8))*d7;
f9=flujo*d8;
A(i,18)=-inversion(Li)+f1+f2+f3+f4+f5+f6+f7+f8+f9;
i=i+1; h=h+1; end end
g=g+1; end end
f=f+1; end end
d=d+1; end end
c=c+1; end end
b=b+1; end end
a=a+1; end
e=e+1; end end
l=l+1; end end
q=q+1; end end
p=p+1; end end
m=m+1; end end
r=r+1; end end
s=s+1;end
Li=Li+1;
end
Lk=Lk+1;
Li=1;
end
xlswrite('C:\Users\john\Documents\trabajosmatlab\tesina\maya.xlsx',A,'H')

```

Bibliografía

- [1] G. Rothwell, “A real options approach to evaluating new nuclear power plants”, *The energy Journal* , **27**, No.1 (2006).
- [2] J. Smith y K. McCardle, “Options in the real world: Lessons learned in evaluating oil and gas investments”, *Ope. Res.*, **47**.
- [3] J. Smith y R. Nau, “Valuing projects: option pricing theory and decision analysis”, *Management Science*, **41** No.5 (1995).
- [4] D. Luenberger, *Investment science*, Oxford, New York 1998.
- [5] J. Hull, *Options, Futures and another derivatives*, Pearson, Eight edition.
- [6] *Instituto de federal de acceso a la información y protección de datos (IFAI)*, www.ifai.org.mx, No folio 1816400032015.
- [7] *The european wind energy association*, www.ewea.org.
- [8] *Auditoría superior de la federación (ASF)*, www.asf.gob.mx.
- [9] *Comisión federal de electricidad (CFE)*, www.cfe.gob.mx.
- [10] C. Nelson y A. Siegel, “Parsimonious modeling of yield curves”, *The journal of Business*, **60**, No.1 (1987).

-
- [11] A. Borison, “Real options analysis: Where are the Emperos’s Clothes?”, *Stanford University*, Presented at Real Options Conference, Washington, DC July 2003.
- [12] T. Copeland y V. Antikarov, “Real options: A practitioner’s Guide”.
- [13] A. Triantis y A. Borison, “Real optios: state of the practice”, *Journal of Applied Corporate Finance*, **14.2**, 2001.