



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN**  
**INGENIERÍA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**APLICACIÓN DE OPCIONES REALES A LA**  
**PROPUESTA DE EXPANSIÓN DE LA CENTRAL**  
**NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**HERNÁNDEZ ITZCUA SELENE**

**TUTOR:**

**Dr. EDGAR ORTIZ CALISTO**



**MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2011**



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.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
--------------------	---

### CAPÍTULO I VALUACIÓN TRADICIONAL DE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

1.1 Importancia de la Valuación de Proyectos de Inversión en las Empresas .....	8
1.2 Métodos Tradicionales .....	10
1.2.1 Métodos sin Descuentos .....	11
1.2.1. Flujo de Caja (Cash Flow) .....	11
1.2.1. Tasa de Rendimiento Contable (Accounting Rate of Return) .....	12
1.2.1.3 Periodo de Recuperación (Pay-Back) .....	12
1.2.2 Razones Financieras .....	13
1.2.3 Métodos con Descuento .....	14
1.2.3.1 Periodo de Recuperación (Pay-Back) Descontado .....	14
1.2.3.2 Razón Beneficio – Costo (ICB) .....	15
1.2.3.3 Valor Presente Neto (VPN) .....	15
1.2.3.3.1 Costo de Capital .....	17
1.2.3.3.2 Wacc (Costo Promedio Ponderado del Capital) .....	17
1.2.3.3.3 Beneficios del VPN .....	19
1.2.3.3.4 Limitaciones del VPN .....	19
1.2.3.4 Tasa Interna de Rendimiento (TIR) .....	20

### CAPÍTULO 2 TEORÍA DE LAS OPCIONES REALES

2.1 La Alternativa de Opciones Reales .....	22
2.2 Opciones Financieras .....	23
2.2.1 Elementos Básicos de la Valuación de Opciones .....	23
2.2.2 Concepto y Características de las Opciones .....	24
2.2.2.1 Perfil de Riesgo-Rendimiento de las Opciones .....	26
2.2.3 Modelos de Valuación de Opciones .....	29
2.2.3.1 Modelo de Black & Scholes .....	31
2.2.3.2 Modelo Binomial .....	34
2.2.3.2.1 Valor de una Opción: Un Periodo .....	34
2.2.3.2.2 Creación del Portafolio de Replicante .....	37
2.2.3.2.3 Valuación Neutral a Riesgo .....	40

2.2.3.2.4	Valor de la Opción: Para N Periodos (Generalizado)	43
2.2.3.2.4.1	Valuación de Opciones Europeas	46
2.2.3.2.4.2	Valuación de Opciones Americanas	48
2.2.3.2.4.3	Valuación de Activos con Dividendos	51
2.2.3.3	Ventajas del Modelo Binomial	54
2.3	Opciones Reales	55
2.3.1	Tipología de las Opciones	58
2.3.1.1	Diferir la Inversión	60
2.3.1.2	Abandonar el Proyecto	64
2.3.1.3	Expandir y/o Reducir la Inversión	67

### **CAPÍTULO 3**

#### **APLICACIÓN DE OPCIONES REALES**

#### **EXPANSIÓN DE LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICALAGUNA VERDE (CNLV)**

3.1	La Energía Nuclear	73
3.1.1	Centrales Nucleoeléctricas y Reactores	74
3.1.1.1	Componentes Típicos de un Reactor Nuclear	75
3.1.1.2	Tipos de Reactores Nucleares	76
3.2	Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV)	77
3.2.1	Ciclo Termodinámico	79
3.2.2	Índices e Indicadores de la CNLV	80
3.2.3	Seguridad Radiológica	83
3.2.4	El Camino hacia la Excelencia	86
3.3	Propuesta de Expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV)	87
3.4	Aplicación de Opciones Reales	89
3.4.1	Metodología del Cálculo de las Variables del Modelo Binomial	89
3.4.1.1	Valor Esperado del Activo Subyacente (S)	89
3.4.1.2	Volatilidad y Constantes de Multiplicación Up y Down (U y D)	95
3.4.1.3	Precio de Ejercicio (X)	96
3.4.1.4	Tasa Libre de Riesgo y Probabilidad Neutral al Riesgo	98
3.4.2	Árbol Binomial	100
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES</b>	<b>105</b>
	<b>APORTE Y OPORTUNIDADES DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>110</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>113</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Emisión de Gases de Efecto Invernadero al Producir Electricidad	2
Figura 1.2 Costos de Generación Eléctrica	3
Figura 1.3 Distribución de Resultados DCF vs Opciones Reales	4
Figura 1.4 Valoración de Proyectos Empresariales	5
Figura 1.5 Modelo Financiero de una Corporación	8
Figura 1.6 Métodos Tradicionales de Valuación de Inversiones	10
Figura 1.7 Razones Financieras	13
Figura 1.8 Comportamiento del VPN ante la WACC	16
Figura 1.9 Tipos de Costos que integran a la Tasa WACC	18
Figura 2.1 Tipo de Opciones	24
Figura 2.2 Estados de las Opciones (Call y Put)	26
Figura 2.3 Perfil Riesgo-Rendimiento	28
Figura 2.4 Evolución del Activo Subyacente descrito en un Modelo Binomial	45
Figura 2.5 Analogía entre las Opciones Financieras y las Opciones Reales	55
Figura 2.6 Asimetría entre las ganancias y las pérdidas en la tenencia de una Opción	56
Figura 2.7 Las Opciones de Crecimiento y el Factor Tiempo	57
Figura 2.8 Tipología de las Opciones	58
Figura 2.9 Valor Intrínseco de las Opciones de Compra y el VPN	62
Figura 2.10 Valor Intrínseco de las Opciones de Venta y el VPN	65
Figura 3.1 Esquema de una Central Nucleoeléctrica	74
Figura 3.2 Componentes y Características de un Reactor Nuclear	75
Figura 3.3 Clasificación de los Reactores Nucleares	76
Figura 3.4 Localización de la CNLV	77
Figura 3.5 Distribución de la Unidad Uno de la CNLV	77
Figura 3.6 Distribución de la Planta Unidades 1 y 2 de la CNLV	78
Figura 3.7 Líneas de Transmisión de la CNLV	78
Figura 3.8 Ciclo Termodinámico de la CNLV	79
Figura 3.9 Porcentaje de Energía Perdida por Falla	80
Figura 3.10 Factor de Capacidad	81

Figura 3.11 Volumen de Energía Neta Producida	81
Figura 3.12 Costo Unitario de Producción	82
Figura 3.13 Sistema de Contención de una Nucleoeléctrica	83
Figura 3.14 Tratamiento de Desechos Radiactivos	84
Figura 3.15 Almacenes de Desechos Radiactivos de la CNLV	85
Figura 3.16 Excelencia en la CNLV	86
Figura 3.17 Centrales Nucleares en el Mundo	87
Figura 3.18 Escenarios de un Programa Nuclear Integral	87
Figura 3.19 Propuesta de Sitios para futuras Plantas Nucleares en México	88
Figura 3.20 Proyección de la Capacidad Efectiva Instalada al año 2024	88
Figura 3.21 Datos Económicos y Técnicos conocidos de la CNLV	90
Figura 3.22 Volumen de Energía Neta Producida de la CNLV (1995-2008)	91
Figura 3.23 Flujos de Efectivo Históricos de la CNLV	91
Figura 3.24 Clasificación de los Pronósticos	92
Figura 3.25 Patrón de los Flujos de Efectivo de la CNLV	92
Figura 3.26 Flujos de Efectivo Futuros de la CNLV	94
Figura 3.27 Mapa del Proyecto Administrando Riesgos mediante la Toma de Decisiones a través de Compuertas	96
Figura 3.28 Costo de Inversión de un Reactor Avanzado en la CNLV	97
Figura 3.29 Brutos y Netos del Interés de la Deuda del Tesoro de los Estados Unidos	99
Figura 3.30 Parámetros del Árbol Binomial de la CNLV	100
Figura 3.31 Árbol Binomial del Activo Subyacente	101
Figura 3.32 Árbol Binomial del Resultado por Ejercicio	102
Figura 3.33 Árbol Binomial de Mantener Viva la Opción	103
Figura 3.34 Árbol Binomial de la Propuesta de Expansión de la CNLV	104
Figura 3.35 Valoración Potencial de los Activos Futuros en los Proyectos	106
Figura 3.36 Opinión sobre la Construcción de Centrales Nucleares en base a sus Ventajas y Riesgo	107
Figura 3.37 Desarrollo de la Energía Nuclear (Generación de Reactores)	109

## INTRODUCCIÓN

Actualmente vivimos en un mundo de globalización marcado como un proceso contemporáneo de hacer los negocios, tomar las decisiones tanto empresariales como económicas de los países, con el comportamiento de la ciudadanía en un entorno de libres mercados y competencia, y el surgimiento transicional y consolidado de las instituciones<sup>1</sup>. Dentro de la globalización financiera se requiere de países que presten atención a su desarrollo debido a que este concepto engloba un proceso de creciente internacionalización del capital financiero, industrial y comercial, nuevas relaciones políticas internacionales y del surgimiento de nuevos procesos productivos, de comercialización y de consumo mal distribuidos geográficamente, una expansión y uso intensivo de la tecnología sin precedentes<sup>2</sup>; así como una integración que marque igualdad en los precios y las condiciones financieras.

México tiene la necesidad de ser parte de esa ola de globalización porque en caso de no hacerlo quedará rezagado y solo en vías de desarrollo<sup>3</sup>. Como agentes fundamentales en el desarrollo de un país y la globalización, se encuentran las empresas nacionales que están continuamente en busca de la innovación, aprovechamiento de los recursos, mejora de su eficiencia económica, desarrollo de sus competencias esenciales y un posicionamiento en el mercado. Para lograrlo las empresas emprenden continuamente planes estratégicos, decisiones y acciones de expansión o achicamiento<sup>4</sup> que además les permita satisfacer las necesidades de sus consumidores, entrar en nuevos mercados o marcar a largo plazo su supervivencia en él.

A su vez, el grado de avance de una sociedad está estrechamente ligado al consumo de energía en general, y a la electricidad en particular. La industria, el transporte, el comercio, el sector residencial, en fin, toda la actividad humana requiere de energía. Hoy en día, la mayor parte de la energía eléctrica, térmica y motriz que se consume a nivel mundial se genera a partir de recursos no renovables, mediante el quemando combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo). El resultado del uso dominante de estos combustibles ha traído como consecuencia la generación de lluvia ácida y el incremento desmedido de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), y con ello un aumento de la temperatura de la atmósfera; hecho que está afectando el clima de la Tierra.

---

<sup>1</sup> Edgar Ortíz, 2009. Finanzas y Productos Derivados. Contratos Adelantados, Futuros y Opciones, Swaps. UNAM, en proceso.

<sup>2</sup> Patricia Aguilar Gaggini, Comercio Internacional

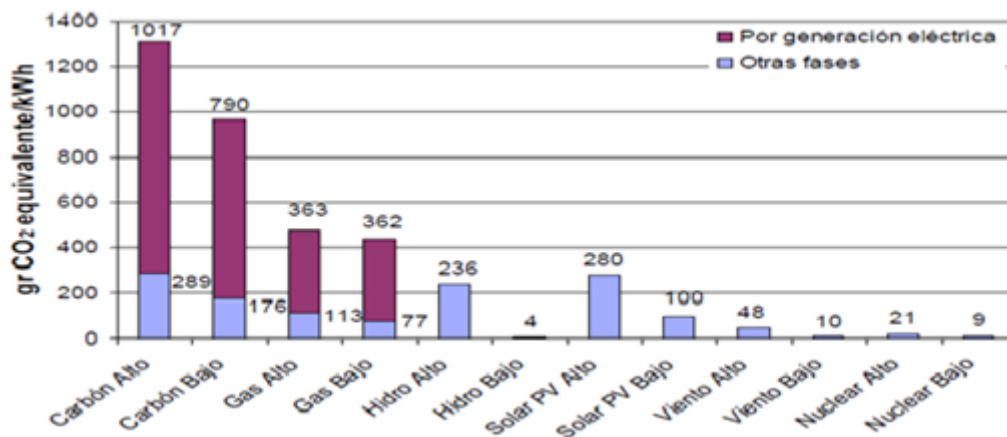
<sup>3</sup> Dentro de las vertientes que interactúan como piezas para el desarrollo de un país y marcan la pauta de su posicionamiento en un mundo globalizado se encuentran, el bienestar de sus ciudadanos, el crecimiento económico del país y la adaptación y aprovechamiento de los cambios tecnológicos que van surgiendo con la innovación en el campo científico.

<sup>4</sup> Un plan de expansión puede ser representado por más de una forma, sin embargo las más comunes son mediante el aumento de tamaño de las empresas, incremento en el número de sus sucursales, fusión o absorción de otras corporaciones y la creación de nuevos productos o servicios basados en el aprovechamiento del desarrollo tecnológico.

Por su parte una estrategia de achicamiento suele estar basada en la necesidad que las empresas tienen de permanecer en el mercado o no perder su posición competitiva en él, surge como respuesta a la reducción de costos prescindiendo de sus activos fijos o variables.

Entre las distintas fuentes de energía primaria disponibles en la actualidad, la energía nuclear representa una de las opciones que permite producir energía en condiciones ambientalmente satisfactorias. De hecho, si se considera únicamente la etapa de generación eléctrica, la emisión de gases de efecto invernadero es nula. Tomando en cuenta toda su cadena energética, es decir, considerando no sólo la etapa de generación eléctrica, sino también las etapas asociadas al ciclo de combustible, la energía nuclear tiene una emisión muy baja de GEI<sup>5</sup>.

**Figura 1.1 Emisión de Gases de Efecto Invernadero al Producir Electricidad**



A nivel nacional, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV), es la responsable de brindar disponibilidad de energía nuclear a un precio accesible y con la confiabilidad de poder generarla de manera segura. Hoy más que nunca, ante las proyecciones efectuadas en el estudio sobre las perspectivas de la evolución mundial en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática (WETO), durante el período 2000-2030, que revela que la demanda mundial de energía aumentará a un ritmo aproximado del 1.8% anual<sup>6</sup>, la CFE debe ejecutar una planeación estratégica futura, que garantice a la sociedad mexicana la seguridad de suministro de electricidad y al mismo tiempo reduzca la dependencia de los hidrocarburos, que además de dañar al medio ambiente, son considerados recursos agotables, sujetos a precios de gran volatilidad.

Una opción a realizarse a partir del 2012 por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en base a la Estrategia Nacional Energética, es el proyecto de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde con la adición de un tercer reactor nuclear como detonador de un programa integral. La energía generada por la CNLV representa un ahorro anual en combustible por unidad de alrededor de 1 millón 96 mil metros cúbicos (6 millones 895 mil barriles)<sup>7</sup> y además usa como combustible nuclear al uranio, que se encuentra en abundancia en la naturaleza (el agua de mar contiene del orden de 3 partes por billón, y con ellos una reserva potencial de 4 mil millones de toneladas).

<sup>5</sup> Juan Luis Francois Lacouture, presentación del libro, La Nucleoenergía un Oportunidad para México, La Academia de Ingeniería de México, 2009.

<sup>6</sup> Este incremento anual está ligado, por un lado, al crecimiento esperado de la población, donde el consumo de electricidad y la vida moderna son prácticamente sinónimos, y por el otro, al desarrollo industrial de la sociedad.

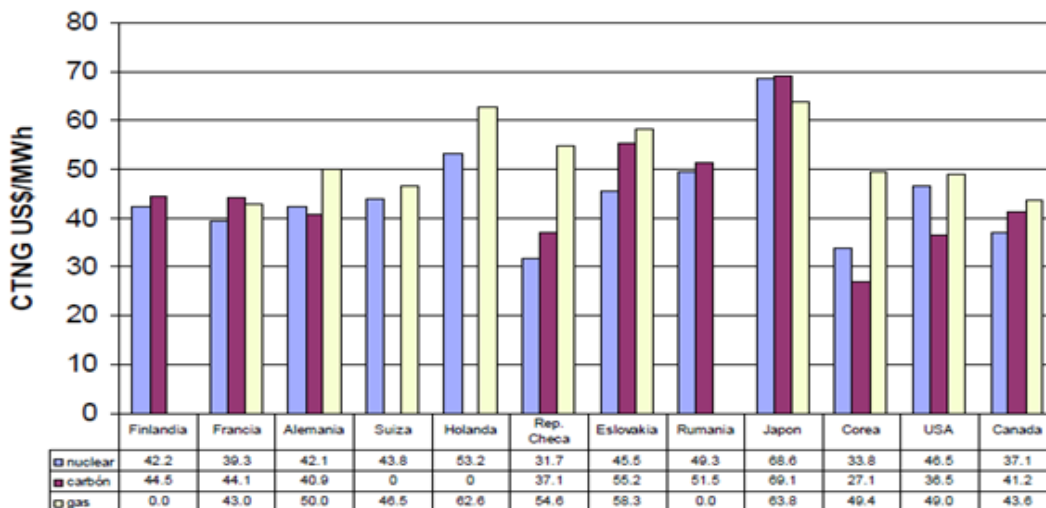
<sup>7</sup> Azucena Gómez Velázquez, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas, Presentación Introducción a la Central Laguna Verde, agosto 2009. <http://www.cenapred.gob.mx>



Las reservas de uranio mundiales razonablemente seguras y las adicionales estimadas, se calculan, excluyendo la exURSS, China y los demás países socialistas, en 4.3 millones de toneladas de óxido de uranio ( $U_3O_8$ ). De éstas unas 10, 600 toneladas se encuentran en México, cantidad suficiente para las recargas de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde durante toda su vida, con un excedente del 30%. Además se estiman reservas de alrededor de 150, 000 toneladas de  $U_3O_8$  asociadas a la roca fosfórica de Baja California, cuya recuperación está condicionada a la capacidad futura de producción de ácido fosfórico en el país<sup>8</sup>.

Finalmente, es preciso mencionar que la energía nuclear, dentro de las alternativas más empleadas, es actualmente desde el punto de vista económico, una de las fuentes de energía viable al tener los menores costos de generación eléctrica en el mundo:

**Figura 1.2 Costos de Generación Eléctrica**



Fuente: OECD/NEA Nuclear Energy Agency, 2005.

Costo total nivelado de generación, 2005 (US\$/MWh).

	Gas	Nuclear	Geotermia	Carbón	Combustóleo
<b>Inversión</b>	8.39	31.87	23.23	27.14	19.33
<b>Combustible</b>	47.85	6.57	21.34	16.43	49.79
<b>O. y M.</b>	3.78	8.96	7.56	7.35	5.76
<b>Total</b>	60.02	47.40	52.13	50.92	74.88

Fuente: COPAR Generación 2006, CFE

La energía nuclear es viable desde la perspectiva de generación de electricidad, por que como la tabla anterior lo muestra, el costo del combustible no representa un factor determinante en el precio de la nucleoelectricidad, solo basta con no dejar de prescindir del uranio. Sin embargo el principal costo está representado por la inversión, por lo cual, para saber si resulta viable o no como proyecto este tipo de centrales constituidas por reactores nucleares, es necesario hacer un análisis de los flujos de efectivo que considere el valor del dinero en el tiempo, el riesgo marcado por la incertidumbre de factores tanto externos como internos a la CNLV y que además le otorgue flexibilidad a la CFE ante cualquier situación.

<sup>8</sup> Comisión Federal de Electricidad, Del Fuego a la Energía Nuclear, 2010.

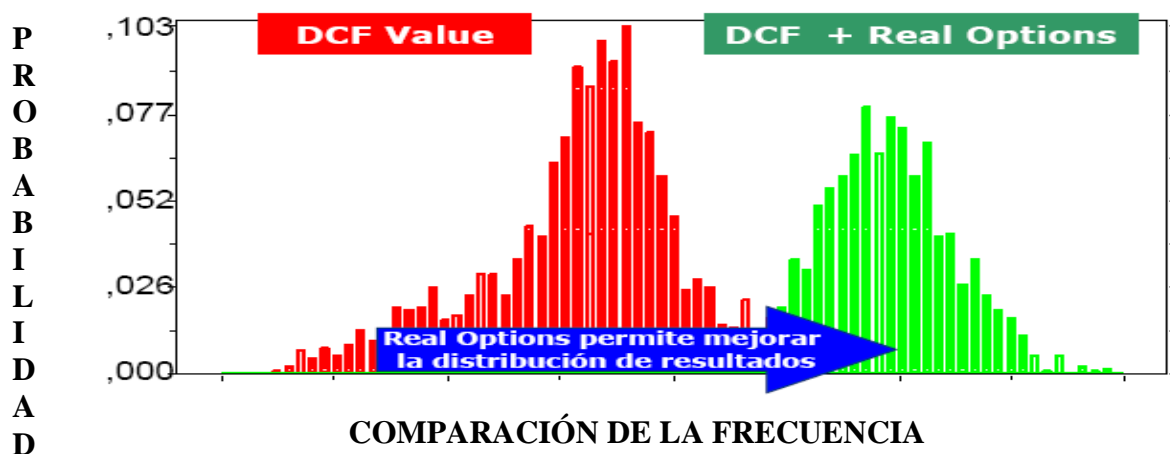
## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, los planes de expansión o achicamiento y los proyectos de inversión se evalúan con metodologías tradicionales que no estiman adecuadamente el valor real de las opciones. Las metodologías comúnmente utilizadas son valuaciones sin descuento<sup>9</sup>, sin embargo son las menos recomendables porque solo considera un análisis aritmético de los flujos de efectivo del proyecto sin agregar un análisis financiero<sup>10</sup>, los datos usados son obtenidos por prácticas estandarizadas de registro de operaciones que generalmente no coinciden con la situación real de la empresa y no agrega el costo oportunidad del capital.

El método de valuación más aceptable hasta el momento es el Valor Presente Neto (VPN). La importancia de este método financiero radica en que permite tomar en cuenta las variables que efectivamente afectan los flujos de efectivo del proyecto, descontándolos<sup>11</sup> a valor presente al costo de oportunidad del capital, es decir toma en cuenta los flujos de efectivo futuros que generará la inversión. Sin embargo el VPN presenta limitaciones al suponer que no se harán ajustes a medida que se presentan diferentes periodos y se considera que la inversión es irreversible<sup>12</sup>. Esto significa que existe la incertidumbre de saber si se ha hecho la mejor inversión si el entorno o las condiciones en las que se tomó la decisión cambiaran, generando con ello la falta de flexibilidad en el método para poder adecuar un proyecto de inversión según los distintos escenarios que se presenten.

Lo anterior presenta una razón suficiente para aplicar en esta tesis una metodología de la ingeniería financiera, Opciones Reales, en específico el modelo Binomial que fragmenta el tiempo de expiración del proyecto en potencialmente un número grande de intervalos de tiempo o pasos, esto sobrepone los problemas del VPN tradicional al ser una metodología que presenta una valuación flexible de la opción (c) que incluye el riesgo generado por la incertidumbre, usando un VPN extendido:  $VPN_{\text{extendido}} = VPN_{\text{tradicional}} + C$

**Figura 1.3 Distribución de Resultados DCF vs Opciones Reales**



<sup>9</sup> Las valuaciones sin descuento no considera el valor del dinero en el tiempo.

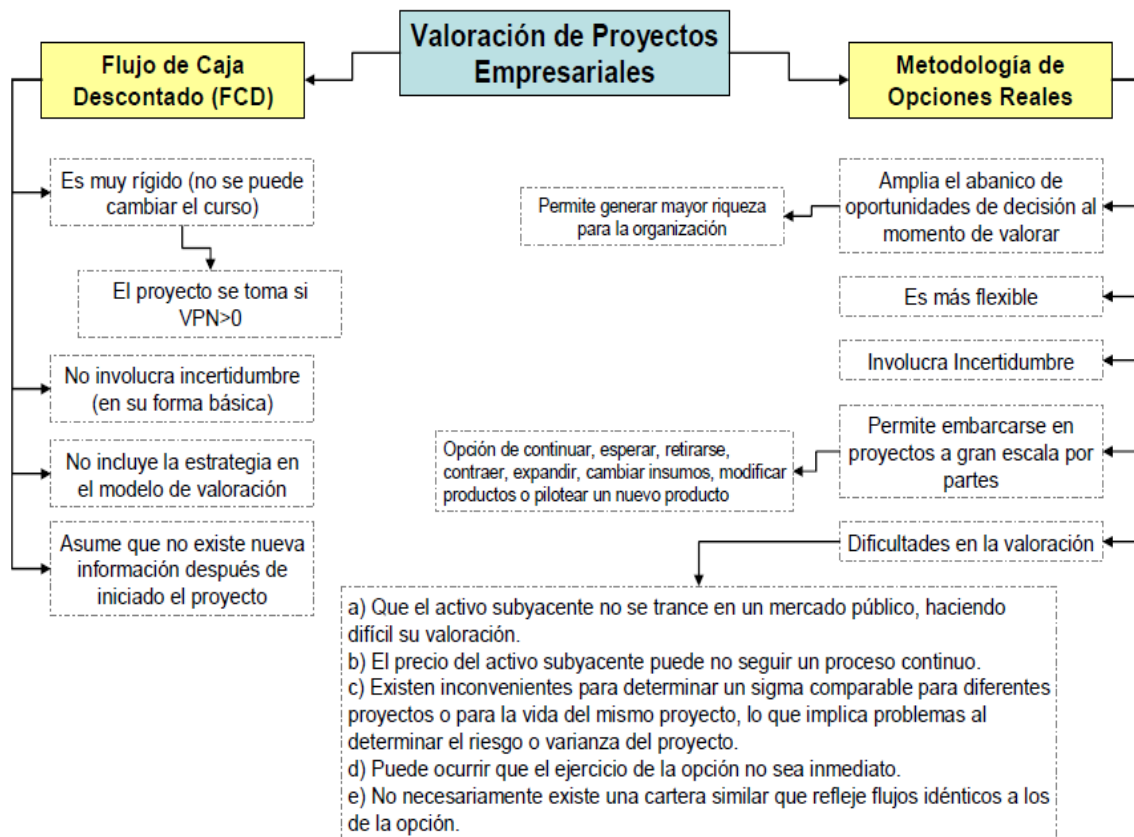
<sup>10</sup> No considera los riesgos macroeconómicos, tipo de cambio, inflación, estabilidad política, leyes fiscales, etc.

<sup>11</sup> A través del nivel de exigencia inicial del proyecto mediante la tasa WACC que se definirá más adelante en esta tesis.

<sup>12</sup> Edleson, Real Options: Valuing Managerial Flexibility.

Con la ventaja de no estar sujeto a un solo plan de acción, la metodología de Opciones Reales, toma en cuenta las oportunidades de capital, los riesgos y las alternativas debido a que está dada por la incertidumbre de las posibles variables críticas que determinan los flujos de efectivo a producir por el proyecto, uniendo la estrategia de la empresa con la estrategia financiera; sus modelos son variaciones en los modelos estándar que descuentan flujos de efectivo (DCF), los cuales se ajustan en base al hecho de que las decisiones de la dirección pueden ser modificadas en el futuro de acuerdo con la información que esté disponible en ese momento.

**Figura 1.4 Valoración de Proyectos Empresariales<sup>13</sup>**



## OBJETIVO DE LA TESIS

Aplicar la metodología de Opciones Reales, específicamente el Modelo Binomial, para determinar si existe o no viabilidad en los planes estratégicos de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) a través de la implementación de un tercer reactor nuclear por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

<sup>13</sup> Ricardo García Molina, Opciones Reales como Herramienta para las Decisiones Estratégicas en Colombia.

## CONTENIDO CAPITULAR

### CAPÍTULO 1 VALUACIÓN TRADICIONAL DE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

Se examinarán los métodos y criterios más utilizados para hacer una evaluación de proyectos de inversión, incluyendo los parámetros en los que se basan, los criterios de decisión y sus principales deficiencias.

### CAPÍTULO 2 TEORÍA DE LAS OPCIONES REALES

Se presentarán los Fundamentos de las Opciones Financieras, sus elementos básicos, características y criterios, así como ejemplos que ayuden a su comprensión, para presentar a través de una analogía a la Teoría de Opciones Reales como una metodología alternativa y eficiente para la valuación de proyectos de inversión, incluyendo el tipo de opciones que permite valorar y la construcción de su respectivo Árbol Binomial.

### CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DE OPCIONES REALES EXPANSIÓN DE LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE (CNLV)

Se dará una breve introducción a la energía nuclear, comenzando por sus orígenes, las generalidades de una central Nucleoeléctrica y centrándose en los aspectos importantes de los reactores nucleares (componentes y clasificación). Posteriormente se describirá a la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde y se presentarán índices e indicadores que proyecten el desempeño que ha mantenido esta empresa, la seguridad radiológica que brinda y el reflejo de su éxito. Por último se dará a conocer cuál es la propuesta de la opción de expansión y se aplicará la metodología de Opciones Reales, a través del cálculo de las variables que involucra y la construcción de un Árbol Binomial.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se dará a conocer si existe viabilidad o no en la opción de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, a partir del valor estimado en el  $VPN_{\text{extendido}}$ , se presentará mediante un diagrama la síntesis el enfoque aplicado en esta tesis y se harán recomendaciones tanto al lector como a la Comisión Federal de Electricidad para que pueda darse un fortalecimiento y unificación de la nucleoelectricidad en el país.

*CAPÍTULO I*  
*VALUACIÓN TRADICIONAL DE LOS*  
*PROYECTOS DE INVERSIÓN*

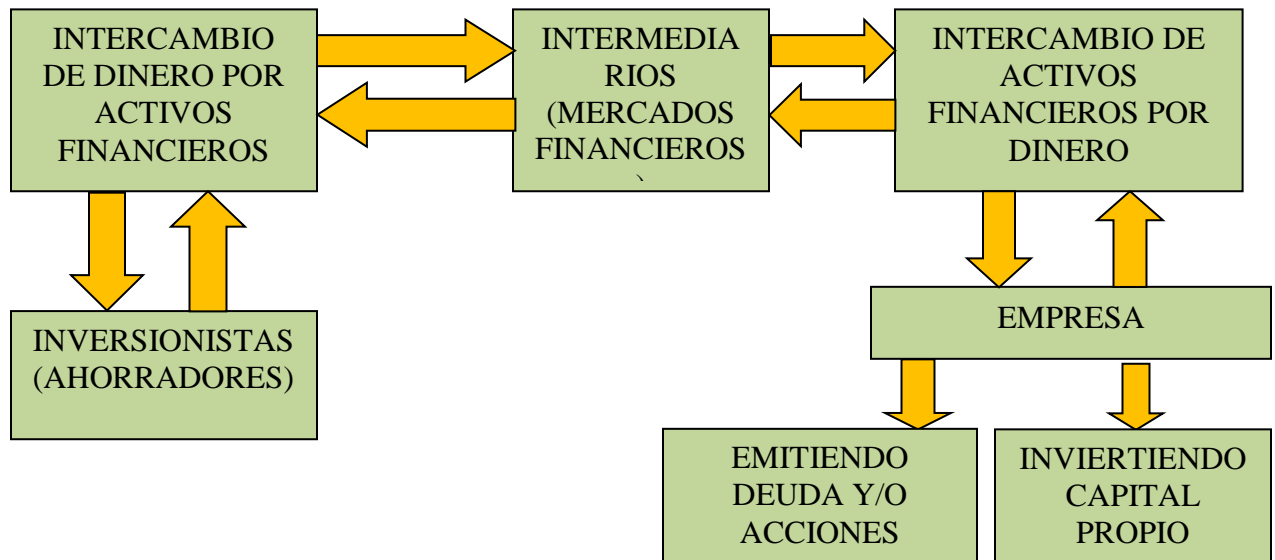
## 1.1 IMPORTANCIA DE LA VALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN EN LAS EMPRESAS

Es importante para las empresas que presentan un dilema entre la inversión u omisión de un proyecto llevar a cabo una valuación clave de la opción que contemplan realizar, con el objetivo de contar con un escenario que presente además de los posibles beneficios del proyecto, el riesgo, la flexibilidad y un planteamiento eficaz que determine el momento más adecuado para realizar la inversión.

Podemos decir entonces que la valuación de un proyecto de inversión es una herramienta financiera que refleja en el presente, si una inversión en una opción planeada a futuro será un éxito o un fracaso, generando así la consciencia de que si bien se pueden tener ideas rentables dentro de una corporación, también se generan ideas empresariales que no deberían ser impulsadas por que pueden significar la pérdida parcial o total de sus recursos e inclusive la pérdida de una posición dentro del mercado competitivo.

Dicho de una manera más rigurosa la importancia de la valuación de proyectos de inversión en las empresas radica en el modelo financiero de la corporación<sup>14</sup>, que tiene como parte de su estructura que se conjunen intercambios de recursos por activos financieros, para cumplir con el objetivo de incrementar el valor de la empresa en el mercado y de este modo generar simultáneamente beneficios para el propietario y sus inversionistas<sup>15</sup>.

**Figura 1.5 Modelo Financiero de una Corporación**



<sup>14</sup> El modelo financiero de una corporación se define como la conjunción de proyectos de inversión y de financiamiento, acordes al contexto y objetivos de la empresa; teniendo en cuenta, el flujo del sistema financiero mexicano.

<sup>15</sup> José Angel Carbajal Lujano, Opciones Reales, estrategia empresarial en las decisiones de inversión, 2006.

Como parte del modelo financiero de una empresa moderna y en un entorno globalizado debe considerarse en un principio una planeación que permita dar pauta a la gestión y control de todos los aspectos financieros referentes a las operaciones de la institución, que incluya además las decisiones de movimientos de flujos tanto cotidianos como a mediano o largo plazo. Estos últimos están enfocados directamente a los proyectos futuros de las corporaciones.

De manera tal que un modelo financiero permite incrementar el valor de la empresa haciendo uso del intercambio de recursos y de la ejecución de sus proyectos de inversión; durante este proceso es importante ser capaz de determinar dos parámetros:

- El valor actual de las obligaciones
- El valor de los beneficios futuros esperados

El valor actual de las obligaciones estará constituido por la estimación del valor de sus bonos y acciones, así como de la presupuestación de su capital. Mientras que el valor de los beneficios futuros estará en función de los rendimientos requeridos para el proyecto y la selección de las mejores fuentes de financiamiento, entre otros aspectos<sup>16</sup>. Bajo un contexto ideal los factores de los que dependen los beneficios futuros permanecerían constantes desde el momento de su estimación hasta el término del proyecto.

Sin embargo en el mundo real existe inestabilidad e incertidumbre<sup>17</sup> acerca del comportamiento de la economía, provocando que se genere un factor determinante dentro de la aceptación o rechazo de proyectos definido como riesgo (variación en las tasas de interés, el tipo de cambio, los precios de títulos accionarios, los flujos de efectivo, los rendimientos nominales y reales, los precios de los productos, etc.), generando con esto que se afecten tanto los gastos como las ganancias de las empresas y de los inversionistas e incluso determinando la sobrevivencia de las primeras, y en el caso de los segundos exigiendo una prima que compense el riesgo asumido por su inversión.

Además actualmente los métodos tradicionales de valuación de proyectos a los que recurren las empresas para sus planes estratégicos futuros siguen considerando un contexto ideal, dejando de lado el contexto real competitivo, marcado por la globalización y la generación continua de herramientas de innovación financiera, es decir descartando el factor riesgo y manteniendo una misma postura de principio a fin.

<sup>16</sup> Yolanda Daniel Chichil, Como reducir la incertidumbre en las finanzas, UAM, 2000.

<sup>17</sup> La incertidumbre es la incapacidad de asignar probabilidades objetivas (o frecuencias relativas basadas en el mejor conocimiento científico del que se disponga) a la posibilidad de ocurrencia de un evento.

## 1.2 MÉTODOS TRADICIONALES

Los métodos tradicionales pueden dividirse en dos sub categorías:

- Los Métodos sin descuentos
- Los Métodos con descuentos

Los criterios de valuación y selección para las opciones de inversión pueden reflejarse para cada caso de la siguiente manera:

**Figura 1.6 Métodos Tradicionales de Valuación de Inversiones**

Tipo de Criterio	Característica Económica	Métodos Usados
Métodos tradicionales Sin descuento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Están basados en los Históricos de las corporaciones (Estados Financieros).</li> <li>• <b>No contemplan la secuencia de los flujos de caja y el valor del dinero en el tiempo.</b></li> <li>• No se considera el costo de oportunidad de la inversión</li> <li>• No considera las variables exógenas que pueden afectar al proyecto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de Caja (Cash Flow)</li> <li>• Tasa de Rendimiento Contable (Accounting Rate of Return)</li> <li>• Periodo de Recuperación del Efectivo conocido también como Pay-Back</li> </ul>
	Herramientas de Apoyo a la toma de decisiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Razones Financieras</li> </ul>
Tipo de Criterio	Característica Económica	Métodos Usados
Métodos tradicionales con descuento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Están basados en los Históricos de las corporaciones (Estados Financieros).</li> <li>• <b>Contemplan la secuencia de los distintos flujos de caja y el valor del dinero en el tiempo mediante la actualización o descuento.</b></li> <li>• Involucra en el análisis las variables de riesgo que afectan el proyecto.</li> <li>• Compara el retorno del proyecto con el costo del mismo.</li> <li>• Son muy utilizados por qué homogenizan las cantidades de dinero recibidas en distintos momentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodo de Recuperación descontado conocido también como Pay-Back descontado</li> <li>• Razón Beneficio –Costo (ICB) también conocido como índice de Rentabilidad</li> <li>• Valor Presente Neto (VPN)</li> <li>• Tasa Interna de Rendimiento (TIR)</li> </ul>



### 1.2.1 Métodos sin descuentos

Los métodos sin descuentos están integrados por métodos que son cuantificables a una fecha actual, éstos han sido los que tienen mayor tiempo de uso como herramienta de valuación; sin embargo deben ser los primeros en descartarse por que aunque contienen elementos financieros no involucran su análisis ni consideran el costo de oportunidad de la inversión que elimina la posibilidad de la empresa de poder invertir la misma cantidad de efectivo en otro proyecto que le pueda brindar mayor rendimiento a un mismo riesgo. Otro problema es que los datos históricos en los que se basa son generados por prácticas estandarizadas de registro de operaciones. Además deja por fuera el riesgo macroeconómico que seguramente afectarán el valor real de los flujos de efectivo a lo largo de la vida del proyecto, incluso incrementando el riesgo del mismo<sup>18</sup>.

#### 1.2.1.1 Flujo de Caja (Cash Flow)<sup>19</sup>

Este método ofrece una información de movimientos de la empresa, es un instrumento que proporciona una medida de la autofinanciamiento<sup>20</sup> y refleja el flujo de los fondos generados internamente, obtenidos de una relación de entradas y salidas de dinero (ingresos y gastos pagables) como se indica en la siguiente expresión:

$$\text{Flujo de Caja Económico} = \text{Utilidad Neta} + \text{Gastos no Desembolsables}$$

Los gastos no desembolsables son:

- Amortización de activos fijos intangibles
- Depreciación de los activos fijos tangibles
- provisión de cuentas malas
- amortización de gastos diferidos, etc.

Los principales puntos débiles de este método pueden resumirse en:

- Los flujos de entradas y salidas de caja o efectivo están referidos solo a un período dado.
- El flujo de caja solo incluye lo que se paga o se cobra (no considera lo que se debe pagar).

---

<sup>18</sup> Jorge Enrique Chávez Ocaña, Métodos Alternativos de Evaluación de Proyectos, Universidad Francisco Marroquín, Facultad de Ciencias Económicas, 2004.

<sup>19</sup> También existe el Cash Flow descontado (actualizado) que toma los beneficios brutos antes de amortizaciones para cada uno de los años de la vida útil del proyecto, y los actualiza o descuenta conforme a una tasa de interés. Sin embargo es más frecuente el uso del Cash Flow ordinario por las corporaciones.

<sup>20</sup> Jesús Mesa Oramas, Métodos para la Evaluación de Proyectos, curso del área Gestión de Proyectos.

### 1.2.1.2 Tasa de Rendimiento Contable (Accounting Rate of Return)

El Método de la Tasa de Rendimiento Contable (TRC)<sup>21</sup> consiste en comparar el beneficio contable con el valor de la inversión, escogiendo aquel proyecto cuya TRC sea mayor en relación a los demás. La TRC se obtiene como el promedio de la utilidad después de impuestos dividida entre el importe de la inversión inicial como se indica en la siguiente expresión.

$$TRC = \frac{B_n}{I} ; \text{ con } B_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n B_t$$

Donde:

n: cantidad de períodos de que consta la inversión.

B<sub>t</sub>: beneficio que reporta la inversión en el período t.

B<sub>n</sub>: beneficio neto anual promedio.

I: inversión.

M<sub>i</sub>: monto inicial de la inversión.

Los principales puntos débiles de este método pueden resumirse en:

- Se utilizan las utilidades históricas y no los flujos de caja, por lo cual no se tiene en cuenta el rendimiento marginal de la inversión.
- No tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo.
- Según este criterio son preferibles los proyectos con elevados beneficios de corta duración, lo cual no siempre es así.

### 1.2.1.3 Período de Recuperación (Pay-Back)

Es un método sencillo, sobre todo para empresas pequeñas<sup>22</sup>, que se fundamenta en determinar el plazo de recuperación del costo de la inversión y seleccionar entre proyectos mutuamente excluyentes a aquel cuyo plazo de recuperación inicial es menor. La decisión de invertir o no se toma comparando el período de recuperación del monto de la inversión del proyecto con algún estándar predeterminado.

En la práctica, el Período de Recuperación (P<sub>r</sub>) se determina acumulando el número de periodos que se requieren para recuperar el desembolso inicial de capital del proyecto, se determina bajo la siguiente expresión:

$$p_r = \text{Número de Años antes a la recuperación completa de la Inversión Neta} + \frac{\text{Inversión Inicial no recuperada al inicio del Año}}{\text{Flujo de Efectivo Durante el Año}}$$

<sup>21</sup> Este indicador es similar al Rendimiento Sobre Activos (ROA) o al Rendimiento Sobre el Capital (ROE).

<sup>22</sup> Se emplea en la actualidad para evaluar decisiones de pequeños gastos de capital cuando el costo de los otros métodos es superior a los beneficios de escoger mejores elecciones entre las alternativas. Véase Alberto Domingo Ajenjo, Dirección y gestión de proyectos, 2000.

En este método si el periodo de recuperación del proyecto es menor que el periodo de recuperación máximo permitido, el proyecto se acepta, de lo contrario se rechaza. Sus principales puntos débiles puede resumirse en:

- No contempla los flujos de caja que se generan después del periodo de recuperación.
- No considera el momento en el cual se dan los flujos de caja dentro del periodo de recuperación.

### 1.2.2 Razones Financieras

Consisten en cocientes sobre rubros que corresponden a cuentas de los estados financieros, con la finalidad de generar un indicador que refleje los puntos fuertes o débiles de la corporación, indicando también probabilidades y tendencias, pudiendo así determinar qué cuentas de estos estados requieren de mayor atención en el análisis. Por lo anterior es importante destacar que las **razones financieras son solo un apoyo para la toma de decisiones en los proyectos más no representan un método para evaluar**. Las razones Financieras más comunes en las empresas son:

**Figura 1.7 Razones Financieras**

Razón Financiera	Expresión que la Define	Significado en la Empresa
Liquidez	$Razón\ circulante = \frac{Activos\ circulante}{Pasivos\ circulante}$	Es la capacidad para saldar las obligaciones a corto plazo que se han adquirido a medida que éstas se vencen. Se refieren no solamente a las finanzas totales de la empresa, sino a su habilidad para convertir en efectivo determinados activos y pasivos corrientes.
Análisis de Actividad	$Rotación\ de\ inventario = \frac{Ventas}{Inventario}$	Es la velocidad con que diversas cuentas se convierten en ventas o efectivo. Con respecto a las cuentas corrientes, las medidas de liquidez son generalmente inadecuadas, porque las diferencias en la composición de las cuentas corrientes de una empresa afectan de modo significativo su verdadera liquidez.
Rotación de Cuentas por Cobrar (RCC)	$RCC = \frac{Ventas\ anuales\ crédito}{Pr\ o\ medio\ de\ cuentas\ por\ cobrar}$	Es la liquidez de las cuentas por cobrar por medio de su rotación.
Plazo promedio de cuentas por cobrar (PPCC)	$PPCC = \frac{360}{Rotación\ de\ cuentas\ por\ cobrar}$	Es una razón que indica la evaluación de la política de créditos y cobros de la empresa.
Rotación de Cuentas por Pagar (RCP)	$RCP = \frac{Compras\ anuales\ crédito}{Pr\ o\ medio\ de\ cuentas\ por\ pagar}$	Sirve para calcular el número de veces que las cuentas por pagar se convierten en efectivo en el curso del año.
Análisis De la Rentabilidad	$Margen\ sobre\ ventas = \frac{Utilidad\ Neta}{Ventas\ Netas}$	Mide el porcentaje de cada peso de ventas que queda después de que la empresa pagó sus productos. Es Eficacia de la empresa para generar utilidades de las ventas que realiza.
Análisis de la Deuda	$CPI = \frac{Utilidad(A.I.I)}{Intereses}$ ; A.I.I=Antes de Interés e Impuestos.	Es la Razón de la Capacidad del Pago de Intereses (CPI) que mide la capacidad de la empresa para efectuar pagos de intereses contractuales, es decir, para pagar su deuda.

### 1.2.3 Métodos con descuento

Los métodos con descuento están integrados por métodos económicos, y consisten en una valuación de inversiones que permite comparar los beneficios que genera el proyecto, con los fondos que provienen de los préstamos y su respectiva corriente anual de desembolsos de gastos de amortización e intereses. Los métodos de evaluación económicos están caracterizados por determinar las alternativas factibles u óptimas de inversión considerando el valor del dinero en el tiempo. Son cuatro los principales métodos financieros usados por las empresas para la valuación de sus opciones<sup>23</sup>.

#### 1.2.3.1 Periodo de Recuperación (Pay-Back) descontado

Algunas empresas usan este método que es una variante del método de recuperación ordinario a excepción de que los flujos de efectivo esperados se descuentan a través del costo del capital del proyecto. De tal forma, el periodo de recuperación descontado se define como el número de años que se requieren para recuperar una inversión a partir de los flujos netos de efectivo descontados.

Así la siguiente expresión de este método (PRD) es:

$$\text{PRD} = \text{Número de Años antes a la recuperación completa de la Inversión Neta} + \frac{\text{Inversión Inicial no recuperada al inicio del Año}}{\text{Flujo de Efectivo Descontado Durante el Año}}$$

En este método si el periodo de recuperación del proyecto es menor que el periodo de recuperación máximo permitido, el proyecto se acepta, de lo contrario se rechaza.

Los principales puntos débiles de este método pueden resumirse en:

- Aunque a diferencia del Periodo de recuperación ordinario este método tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo sigue ignorando los flujos de efectivo que se extienden más allá del período de recuperación, lo cual es un sesgo para los proyectos a largo plazo.
- No considera todos los flujos de efectivo del proyecto de inversión, y por ende no los incluye en el análisis. Igualmente no considera el orden en que se obtienen los beneficios, lo cual reviste interés financiero.
- Si la empresa fija una fecha como límite sólo se aceptarán proyectos de corta duración.

<sup>23</sup> César Aching Guzmán, Matemáticas Financieras para la toma de decisiones empresariales.

### 1.2.3.2 Razón Beneficio – Costo (ICB)

Este criterio relaciona la suma de los flujos de efectivo anuales y el desembolso inicial. Toma en consideración al índice de rentabilidad<sup>24</sup>. Su cálculo es mediante la siguiente expresión:

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{V_i}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+i)^n}}$$

Donde:

B/C: Relación Beneficio-Costo

V<sub>i</sub>: Ingresos (i=0,1,2,3,...,n)

C<sub>i</sub>: Egresos (i=0,1,2,3,...,n)

i: Tasa de Descuentos y n: Número de Periodos de Interés

El criterio de decisión es aceptar la alternativa cuando B/C > 1, en el caso de varias alternativas se toma la que tenga mayor valor en se cociente B/C.

Los principales puntos débiles de este método pueden resumirse en:

- Responsabilidades Legales
- Seguridad y la Satisfacción del cliente
- No son evidentes

Este método es usado actualmente en las valuaciones de inversiones de gobierno, en las entidades crediticias y en menor medida en la valuación de inversiones de empresas<sup>25</sup>.

### 1.2.3.3 Valor Presente Neto (VPN)

El método de valuación más aceptable es el Valor Presente Neto (VPN) que consiste en el valor presente de los flujos de efectivo del proyecto menos el valor inicial a invertir:

$$VPN = \sum_{i=1}^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1+WACC)^n} - Inversión_{inicial}$$

Donde:

VPN: Valor Presente Neto.

WACC = Tasa mínima aceptable de rendimiento, también llamada tasa de Corte (TDC), es la tasa de descuento que se aplica para traer a valor presente.

n: Cada Periodo del proyecto

Flujos<sub>efectivo</sub>: Flujo neto de efectivo del periodo n, o beneficio neto después de impuesto más depreciación.

También se expresa como<sup>26</sup>:

$$VPN = VP - Inversión_{inicial}$$

<sup>24</sup> El índice de Rentabilidad determina cuales son los beneficios por cada peso que se sacrifica en el proyecto. Genera el rendimiento de cada peso invertido en el proyecto descontado al valor presente: IR=VPN/Inversión Inicial

<sup>25</sup> Fuente: PYMES FUTURO, Gerencia, Finanzas, Proyectos, Asesoría y Consultoría para pymes.

<sup>26</sup> Se denomina Valor Presente (VP) al valor actual de los flujos de fondos futuros; es decir:

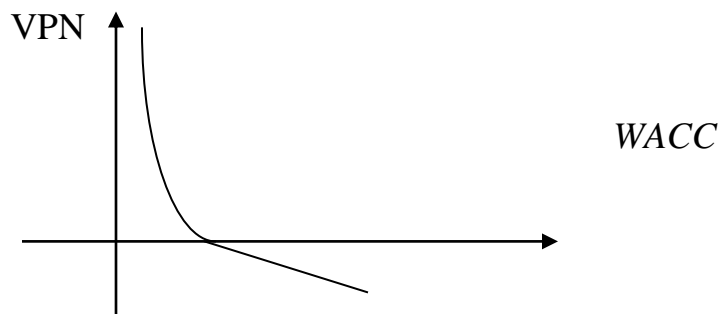
$$VP = \sum_{i=1}^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1+WACC)^n}$$

Su importancia de este método financiero consiste en ser un indicador de recuperación de valores, ya que compara el valor presente de los beneficios futuros esperados de un proyecto con el valor presente del costo estimado, tomando en cuenta las variables que afectan a los flujos de efectivo del proyecto y descontándolos a valor presente al costo de oportunidad del capital. Es decir que el VPN representa el beneficio actualizado en términos de su valor equivalente en el momento cero del proyecto y es la diferencia entre los flujos de fondos actualizados al tiempo cero, y la inversión inicial (que se produce en tiempo cero). La teoría del VPN define:

- Se aceptan los proyectos cuyo VPN sea positivo ( $VPN \geq 0$ ). Lo anterior debido a que un VPN positivo indica que la inversión en el proyecto produce excedentes superiores, es decir que se obtiene un monto incremental a lo que originalmente se invirtió, en la cuantía del VPN, a los que podrían obtenerse invirtiendo esa misma cantidad a la tasa de inversión.
- Se rechazan los proyectos con VPN negativo ( $VPN < 0$ ). Debido a que cualquier VPN que no sea positivo y diferente de cero indicará un proyecto no rentable reflejado en una pérdida.
- En tanto si dos o más proyectos son mutuamente excluyentes, deberá elegirse el que tenga el VPN más alto, mientras mayor sea el valor del VPN más atractivo resulta el proyecto. La condición indispensable para comparar alternativas es que siempre se tome en la comparación igual número de años (n), pero si el tiempo de cada uno es diferente, se debe tomar como base el mínimo común múltiplo de los años de cada alternativa.

Es importante mencionar que la aceptación o rechazo de un proyecto dependerá directamente de la tasa de interés que se utilice. Por lo general el VPN disminuye a medida que aumenta la tasa de interés, de acuerdo con la siguiente gráfica<sup>27</sup>:

**Figura 1.8 Comportamiento del VPN ante la WACC**



Debido a su importancia dentro del criterio de aceptación o rechazo del proyecto se explicará cómo obtener la tasa mínima de rendimiento aceptable (WACC). Para ello se explicará primero el costo de capital.

<sup>27</sup> Beca Urbina, Evaluación de Proyectos, Cuarta Edición, Editorial: Mc Graw Hill, México, 1999.

### 1.2.3.3.1 Costo de Capital

Toda empresa para iniciar un Proyecto necesita de un financiamiento comúnmente llamado financiamiento requerido del proyecto o simplemente denominado capital. Este financiamiento puede generarse de cuatro fuentes distintas:

1. Emitiendo Deuda a largo plazo (Préstamos bancarios)
2. Emitiendo Acciones Preferentes
3. Emitiendo Acciones Comunes
4. Emitido del Capital Propio, Reinvertiendo Ganancias de periodos anteriores (Utilidades Retenidas o del capital contable interno)

Es posible financiar totalmente una empresa con fondos provenientes del capital contable interno sin embargo en la mayoría de las corporaciones debido a la magnitud de sus proyectos, obtienen una porción sustancial de inversión inicial de deudas a largo plazo y muchas de ellas también emplean acciones preferentes y comunes. Para el caso de estas empresas, este financiamiento al igual que cualquier otro factor tiene un costo, denominado como su costo de capital (se expresa como un porcentaje anual, que una firma debe superar para obtener utilidades y a la vez cumplir con sus obligaciones contraídas).

### 1.2.3.3.2 WACC (Costo Promedio Ponderado del Capital)

Un proyecto de inversión llevado a cabo por una empresa es viable solo si los flujos obtenidos son superiores al valor de la inversión, generando utilidades (de donde se pagan dividendos a los accionistas) y recursos suficientes para cubrir las obligaciones contraídas con sus acreedores y tenedores de acciones preferentes. Por lo tanto las empresas deben crear sus inversiones a un valor que supere los costos de su financiamiento. La WACC es una expresión de este costo que representa la Tasa del valor mínimo aceptable que espera ganar cada inversionista por el dinero que aporta, es decir a la rentabilidad mínima pretendida por el inversionista por debajo de la cual estará dispuesto a aportar en el proyecto.

Debido a lo anterior la tasa WACC está en función de cuatro tipos de costos:

$$\text{WACC} = W_d \times \text{Costo de la Deuda después de impuestos} - (W_p) \times \text{Costo de Acciones Preferentes} + (W_e) \times \text{Costo de Acciones Comunes} + (W_s) \times \text{Costo de las Utilidades Retenidas}$$

En donde las  $W_d$ ,  $W_p$ ,  $W_e$  y  $W_s$  representan el porcentaje de los pesos provenientes de las deudas, las acciones preferentes, las acciones comunes y el capital contable común respectivamente, que sirven de estructura óptima<sup>28</sup> para el capital inicial requerido para llevar a cabo el proyecto.

<sup>28</sup> La estructura óptima del capital (fijada como meta) consiste en la única combinación de los porcentajes de deuda, acciones y capital contable común que maximizará el precio de las acciones de la empresa.

**Figura 1.9 Tipos de Costos que integran a la Tasa WACC**

Tipo de Costo	Fórmula	Característica
Costo de la Deuda	$C. Deuda: K_d (1-T)$	Es la tasa de interés en el costo marginal de las deudas <sup>29</sup> . Representa el costo relevante de las deudas nuevas, tomando en cuenta la deducibilidad fiscal de los intereses <sup>30</sup> . Donde $K_d$ es la tasa de interés sobre la deuda nueva y T es la Tasa fiscal marginal de la Empresa.
Costo de Acciones Preferentes	$K_p = \frac{D_p}{P_n}$	Es la tasa de rendimiento que requieren los inversionistas sobre las acciones preferentes, sin ningún tipo de ajuste <sup>31</sup> . Representa la relación del dividendo preferente ( $D_p$ ) respecto al precio neto de la emisión ( $P_n$ ), o el precio que la empresa recibirá después de deducir los costos de flotación <sup>32</sup> . El costo está determinado por $K_p$ .
Costo de Acciones comunes	$K_e = \frac{D_1}{P_0(1-F)} + g$	Es la Tasa de rendimiento que deberá obtenerse sobre los fondos generados mediante la venta de acciones comunes para que la nueva emisión de acciones valga la pena. Representa la relación del dividendo próximo esperado ( $D_1$ ) respecto al precio Neto por acción que recibe la compañía <sup>33</sup> ( $P_0 (1-F)$ ) sumado a la ganancia de capital esperada ( $g$ ). Este costo está determinado por la expresión $K_e$ <sup>34</sup> .
Costo de las Utilidades Retenidas	$K_s = \frac{D_1}{P_0} + g$	Es la tasa de rendimiento que requieren los accionistas sobre el capital contable que obtiene la empresa al retener utilidades <sup>35</sup> . La razón por la cual se debe asignar un costo de capital a las utilidades retenidas se relaciona con el principio del costo oportunidad <sup>36</sup> . Representa la relación del dividendo próximo esperado ( $D_1$ ) respecto al precio en que se venderán las acciones ( $P_0$ ) considerando al igual que en las acciones preferentes a la ganancia de capital esperada ( $g$ ). Este costo está determinado por $K_s$ .

De modo tal que el Costo Promedio Ponderado del Capital (WACC), se define con la ecuación:

$$WACC = W_d K_d (1-T) + (W_p K_p) + (W_e K_e) + (W_s K_s)$$

<sup>29</sup> Entiéndase como costo marginal el costo resultante de obtener otra unidad más (el costo del último elemento nuevo).

<sup>30</sup> En el caso de la mayoría de las corporaciones la Tasa Fiscal federal es del 34%.

<sup>31</sup> No se hace ningún ajuste por que los dividendos preferentes, a diferencia de los gastos de intereses sobre las deudas, nos son deducibles de impuestos, por lo tanto no se producen ahorros fiscales asociados con el uso de las acciones preferentes.

<sup>32</sup> Los costos en los que se incurre para las nuevas emisiones (costo de suscripción)

<sup>33</sup>  $P_0$  el precio en que se venderán las acciones y F es el costo porcentual de flotación resultante de la emisión de nuevas acciones comunes.

<sup>34</sup> El costo de las Acciones comunes también es llamado costo del capital contable externo y se basa en el costo de las utilidades retenidas, pero se incrementa a causa de los costos de flotación (F).

<sup>35</sup> Las utilidades retenidas forman parte del balance general de una empresa y consiste en todas las utilidades que se han retenido en el negocio a través de su historia, así como las utilidades en curso no pagadas como dividendos y que por lo tanto estarán disponibles para reinvertirse en el negocio este mismo año.

<sup>36</sup> El principio básico del Costo de Oportunidad consiste en el precio que tenemos que pagar por tomar una decisión determinada y no haber escogido otras alternativas que pudieran haber representado una mayor ganancia.



### **1.2.3.3.3 Beneficios del VPN**

El método del Valor Presente Neto es muy utilizado por tres razones:

- Porque es un método de muy fácil aplicación y utiliza datos conocidos por la empresa, porque actualiza los flujos de efectivo con las exigencias específicas de los inversionistas con su tasa de descuento WACC y además considera la inversión inicial.
- Porque al actualizar los flujos de efectivo, todos los ingresos y egresos futuros se transforman a pesos de hoy y así puede verse fácilmente si los ingresos son mayores que los egresos, conociendo de esta manera el beneficio que generará el proyecto. Cuando el VPN es menor que cero implica que hay una pérdida a una cierta tasa de interés o por el contrario si el VPN es mayor que cero se presenta una ganancia. Cuando el VPN es igual a cero se dice que el proyecto es indiferente.
- **Porque a través del Valor Presente Neto, es posible conocer el valor de la empresa a partir de sus negocios actuales.**

### **1.2.3.3.4 Limitaciones del VPN**

Es importante mencionar que dentro de los métodos para la valuación de opciones en las empresas el VPN representa al mejor de ellos. Sin embargo también se debe considerar que este método presenta ciertas limitantes:

- Deficiencia en la flexibilidad de la opción: Supone que no se podrán hacer ajustes a medida que se presentan diferentes escenarios y se considera que la inversión es irreversible<sup>37</sup>.
- Considera únicamente a todo el proyecto como un periodo: Sin aplicar el panorama de la rentabilidad del proyecto en otro momento bajo otras circunstancias.
- El uso estocástico que integra la incertidumbre y con ello el riesgo: Marcado por los cambios en la economía y en la propia empresa. Supone que no existirá variación en el precio de los activos, es decir considera una volatilidad igual a cero.

---

<sup>37</sup> Edleson, Real Options: Valuing Managerial Flexibility.

#### 1.2.3.4 Tasa Interna de Rendimiento (TIR)

Existe también la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) que es la tasa de descuento que genera que el VPN sea igual a cero:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Flujos}_{\text{efectivo}}}{(1+TIR)^t} - \text{Inversión}_{\text{inicial}} = 0$$

Esto hace que el modelo sea usado cuando se requiere saber si el rendimiento del proyecto es mayor o menor al costo oportunidad del capital, buscando siempre una tasa que genere rendimientos superiores a los mínimos aceptados. Podemos deducir entonces que el criterio financiero de decisión para la TIR consiste en aceptar el proyecto cuando su valor sea mayor o igual al costo de oportunidad del capital, concretamente la tasa “barrera” a superar es el costo del capital promedio (WACC). Por lo tanto la TIR representa un indicador de rendimiento<sup>38</sup>, en donde el proyecto tendrá beneficios solo cuando se cumpla que la  $TIR > WACC$ .

#### *Limitaciones de la TIR*

Pero esta metodología no es recomendable debido a que presenta las mismas limitaciones del VPN ya que para que la TIR sea efectivamente la rentabilidad, debe cumplirse que no existan desembolsos a lo largo del proyecto a cambios en él (falta de flexibilidad) y tampoco representar el nivel de riesgo del proyecto bajo otras circunstancias debido a que su nivel de riesgo está dado por la tasa de descuento utilizada. Y además este método presenta otras limitantes más; la principal de ellas son sus raíces múltiples, es decir un proyecto puede contar con varias TIR que hagan del valor presente cero sin cambiar los flujos pero la rentabilidad es solo una o incluso se puede presentar la ocasión en que no se tenga TIR.

En el caso de las raíces múltiples, la pregunta es ¿Cuál de las dos TIR es correcta?, la respuesta real es que ninguna de ellas, porque ni una ni otra dan una medida del valor correcto de la inversión (rendimiento o aumento de riqueza), en un principio se descartaría la tasa con valor negativo pero además se requiere calcular la tasa WACC y analizar si el valor positivo de 31.87% supera al rendimiento mínimo esperado.

En síntesis, el criterio de decisión basado en la TIR requiere someterse a una comparación para su aceptación, esto le da una ventaja al método del VPN que ya integra la tasa mínima aceptable a superar, los retos ahora son vencer las limitantes de la flexibilidad y la incertidumbre que presenta este método. Afortunadamente la metodología de Opciones Reales para valuación de proyectos de inversión propuesta en esta tesis y que se explicará en el siguiente capítulo, vence esos dos obstáculos, convirtiéndola en una mejor alternativa ante los métodos tradicionales.

---

<sup>38</sup> El supuesto que maneja este método es que el retorno que expresa la TIR va a ser cierto solo si los fondos que va devolviendo el proyecto son reinvertidos a una tasa igual a la TIR. Mientras que el retorno que expresó el VPN va a ser cierto solo si los fondos que va devolviendo el proyecto son reinvertidos a una tasa igual a la tasa WACC.

***CAPÍTULO 2***  
***TEORÍA DE LAS***  
***OPCIONES REALES***

## 2.1 LA ALTERNATIVA DE OPCIONES REALES

El capítulo anterior tuvo como finalidad mostrar los métodos tradicionales de valuación de proyectos de inversión, recalcando las limitantes que presentan y el por qué actualmente son una herramienta insuficiente que poseen las empresas para conocer la viabilidad de sus planes estratégicos.

De lo anterior radica la necesidad de una valuación que refleje no solo el rendimiento del proyecto sino que además revele el riesgo y permita mostrar escenarios que se ajusten a los acontecimientos que se presenten, permitiendo tomar decisiones durante el proyecto dando origen a la flexibilidad operativa, lo cual se ve materializado en la existencia de opciones como diferir, abandonar, expandir, achicar, cambiar de actividad o de tecnología. La valuación que cumple con todas estas características y que además plasma la interacción de la inversión con la estrategia de la empresa es la metodología de Opciones Reales.

Como consecuencia esta metodología es la alternativa necesaria de las metodologías tradicionales porque genera valores asociados a través de las oportunidades que se presentan con la flexibilidad y el riesgo en cada periodo, de hecho, la principal característica de las opciones reales radica en el incremento potencial de valor en aquellos proyectos con un elevado grado de incertidumbre y una alta disposición de adaptación en las decisiones iniciales acorde al entorno cambiario.

De manera más rigurosa autores definen a las Opciones Reales como **“un derecho, pero no una obligación, de tomar una acción a un determinado costo por un periodo predeterminado”**<sup>39</sup>. Surge a partir del desarrollo de la teoría de valuación de opciones con los trabajos de Black y Scholes y Merton (1973) en conjunto con las insuficiencias del VPN en la valuación de los proyectos. Así nace la teoría de Opciones Reales, como un complemento del VPN y donde la metodología de valuación es la misma que se utiliza para la valuación de Opciones Financieras. A diferencia de las opciones financieras, la opción no es la compra o venta de un activo financiero, sino la toma de una decisión sobre la inversión.

En este sentido se puede expresar la esencia de las Opciones Reales como un VPN extendido de la siguiente manera:

$$\text{VPN}_{\text{extendido}} = \text{VPN} + \text{Valor de las Opciones Reales}$$

En donde el VPN es el Valor Presente Neto tradicional, es decir, el valor actual de los flujos de efectivo futuros menos la inversión y que se explicó a mayor detalle en el capítulo 1, mientras que para calcular el valor de las Opciones Reales, se utilizan las técnicas de valuación de Opciones Financieras que se explicará a continuación.

---

<sup>39</sup> Copeland, Tom y Antikarov, Vladimir, Real Options, A practitioner's guide, 2001.

## 2.2 OPCIONES FINANCIERAS

Para entender mejor el concepto, las características y el funcionamiento a través de modelos de las opciones financieras se definirán antes los elementos que las integran y que debemos tener claros desde ahorita para poder aplicar Opciones Reales a los fines de esta tesis.

### 2.2.1 Elementos Básicos de la Valuación de Opciones

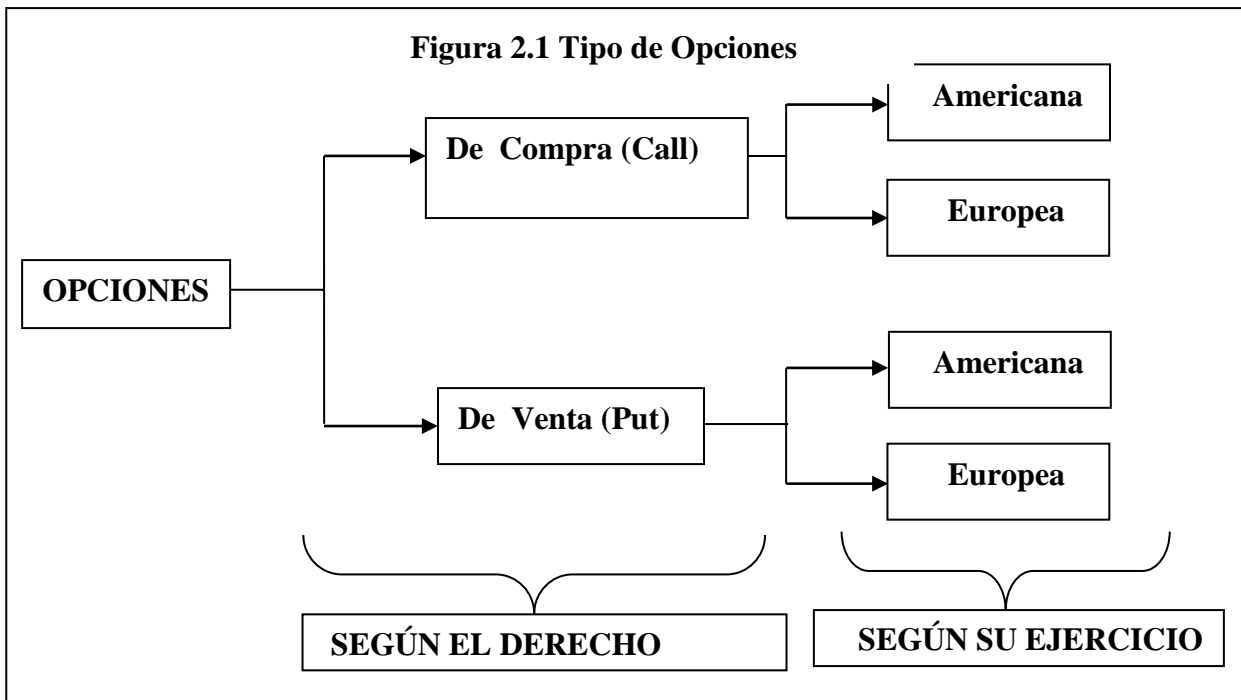
- **Productos Derivados:** Instrumentos financiero cuyo valor se deriva principalmente de un bien denominado **activo subyacente** que puede ser:
  - Materia prima (trigo, oro, petróleo etc.)
  - Activo financiero (bienes, acciones, índices bursátiles, tipos de cambio, divisas, futuros etc.)
- **Precio del Ejercicio:** Es el costo asociado a la acción que se desee tomar. Va a depender del tipo de opción. En una opción de expansión es el valor actual del costo de la inversión que se planea realizar, mientras que en una opción de achicamiento es el valor de venta de los activos comprometidos en la inversión.
- **Tiempo Remanente de Vigencia:** Esta dado por el periodo durante el cual la empresa tiene la posibilidad de ejercer la opción, es decir, el periodo durante el cual tiene vigencia el derecho de tomar una decisión sobre la inversión.
- **Varianza en el Valor del Activo Subyacente:** Es la medida de riesgo del activo subyacente, en este caso, el valor del proyecto. El comprador de una opción adquiere el derecho de comprar o vender el activo subyacente a un precio fijo. Mientras más alta sea la varianza en el valor de ese activo, mayor será el valor de esa opción. Aunque pareciera obvio que un incremento en la medida de riesgo (varianza) debería incrementar el valor, el supuesto no es redundante al tener en cuenta que las opciones son diferentes a otros instrumentos, debido a que los compradores de opciones nunca pueden perder más que el precio que pagaron por ellas y sí tienen el potencial de ganar cifras significativas al existir movimientos con precios grandes.
- **Tasa de descuento correspondiente al periodo de vida de la Opción:** Es la tasa de descuento libre de riesgo. Cuando el comprador de una opción paga el precio carátula de la opción, se involucra un costo de oportunidad por haber invertido en una opción en lugar de otro instrumento financiero. Este costo dependerá del nivel de las tasas de interés y el tiempo hasta la expiración de la opción.
- **Dividendos o Pagos Similares:** Es la retribución a la inversión que se otorga en proporción a la cantidad de acciones poseídas con recursos originados en las utilidades de la empresa durante un periodo determinado. En los modelos de valuación de opciones financieras, se considera la posibilidad de que el activo subyacente pague un dividendo periódico, lo cual modifica el valor de la opción. Algo similar sucede con las Opciones Reales, donde el valor de los dividendos está dado por los flujos de efectivo que se pueden ganar o perder en cada periodo.

## 2.2.2 Concepto y Características de las Opciones

Una opción es un título financiero derivado que por el pago de una prima (precio de la opción) da a su comprador el derecho, más no la obligación de comprar o vender el producto subyacente (activo financiero) a un precio determinado, llamado precio de ejercicio (strike price) durante la vigencia del contrato y hasta la fecha de vencimiento. Al contrario, el oferente de éstos títulos tiene la obligación de vender o comprar el producto subyacente. Al respecto, cabe resaltar que en los contratos de futuros tanto el tenedor como el oferente tiene la obligación de comprar o vender el bien subyacente respectivo<sup>40</sup>.

De modo general, se puede decir que las opciones son contratos bilaterales mediante los cuales una parte paga una suma de dinero a la otra para adquirir el derecho (la opción) de realizar una transacción (compra-venta) determinada o reclamar una suma de dinero en el futuro.

En los mercados financieros, existen diversos tipos de opciones de acuerdo a ciertas características que pueden representar las mismas, pero esta tesis se centrará en los tipos de opciones según el derecho adquirido<sup>41</sup> y su ejercicio<sup>42</sup>, que son justamente los que se utilizan en la teoría de Opciones Reales. De acuerdo a esta clasificación podemos representar en el siguiente cuadro el tipo de opciones que se pueden presentar.



<sup>40</sup> Ortíz, E, 2009. Finanzas y Productos Derivados. Contratos Adelantados, Futuros y Opciones, Swaps. UNAM, en proceso.

<sup>41</sup> Según se adquiriera el derecho a comprar o vender el bien subyacente.

<sup>42</sup> Según la flexibilidad con la que pueden ser ejercidas.

- **Opción de Compra (Call Option):** Es aquella que da a quien la adquiere el derecho de comprar el bien subyacente al precio de ejercicio convenido, independientemente de cuál sea el precio del subyacente en el mercado al contado en el momento de ejercicio.

En la definición se puede observar que el comprador tiene el derecho de comprar y no la obligación de hacerlo. Para poder tener este derecho se debe pagar una prima al vendedor quien tiene la obligación de vender el activo subyacente en la fecha determinada y al precio acordado. Cuando se decide comprar bajo las condiciones del contrato, se dice que se ejerce la opción.

**Opción de Compra Americana:** El comprador puede ejercer la opción en cualquier momento, desde el momento de su compra, hasta la fecha de su vencimiento inclusive.

**Opción de Compra Europea:** El comprador solo puede ejercer la opción en la fecha de su vencimiento.

- **Opción de Venta (Put Option):** Es aquella donde su tenedor (el comprador) tiene el derecho a vender el bien subyacente al precio convenido, independientemente de cuál sea el precio del subyacente en el mercado al contado.

De manera análoga que en una opción de compra, en la definición de una opción de venta se puede observar que el comprador tiene el derecho, pero no la obligación de vender el subyacente bajo las condiciones del contrato (adquiriendo el derecho con el pago de una prima), mientras que el vendedor o subscriptor tiene la obligación de comprar el activo subyacente en la fecha determinada y al precio acordado.

**Opción de Venta Americana:** El tenedor puede vender la opción en cualquier momento, desde que se adquiere el Put, hasta la fecha de su vencimiento inclusive.

**Opción de Venta Europea:** El tenedor solo puede vender la opción en la fecha de su vencimiento.

Podemos concluir entonces que tanto en un Call como en un Put el vendedor de opciones tiene la obligación de cumplir con su contrato, en tanto que el comprador de una opción de compra o de una opción de venta ejerce o no ejerce su derecho de compra o venta, según convenga o no a sus intereses, esta decisión estará en función de:

- 1 El precio de ejercicio del activo subyacente, es decir el precio que pagará y que se representa como  $(X)$
- 2 El precio del activo subyacente en el mercado al momento que se ejerce la opción denominado por  $(S_t)$

### 2.2.2.1 Perfil de Riesgo-Rendimiento de las Opciones

La decisión de ejercer o no, dependerá en gran medida de la aversión al riesgo por parte del inversionista<sup>43</sup>, pero siempre estará enfocada a la búsqueda de obtener ganancias o utilidades, existiendo para todos los casos la posibilidad de generar pérdidas si no se toma una decisión asertiva. En el caso de una opción de compra se debe ejercer siempre que el precio de ejercicio sea menor al precio de mercado del activo subyacente<sup>44</sup>. En caso contrario se ejercerá una opción de venta cuando el precio de ejercicio sea mayor al precio del mercado, obteniendo con esto un pago superior que si se vendiera en el mercado en ese momento. Estas situaciones y otras se expresan en la teoría financiera a través de los estados de las opciones de la siguiente manera:

<b>Figura 2.2 Estados de las Opciones (Call y Put)</b>			
	<b>Estado de la Opción</b>	<b>Opción de Compra</b>	<b>Opción de Venta</b>
-	<b>ITM:</b> In the Money / Dentro del dinero: Cuando el ejercicio de la opción genera ganancias.	$S > X$	$S < X$
-	<b>OTM:</b> Out the Money / Fuera del dinero: Cuando el ejercicio de la opción resulta en una pérdida.	$S < X$	$S > X$
-	<b>ATM:</b> At the Money / En el dinero: Cuando el ejercicio de la opción no genera ganancias ni pérdidas.	$S = X$	$S = X$
-	<b>DTM:</b> Deep in the Money / Profundamente en Dinero	Si el precio del activo subyacente es considerablemente más alto que el precio de ejercicio.	Si el precio del activo subyacente es considerablemente más bajo que el precio de ejercicio.
-	<b>TM:</b> Near the Money / Cercana al Dinero: Si el precio del subyacente está muy cercano al precio de ejercicio.		

<sup>43</sup> La aversión al riesgo es un término referido a las situaciones en las que un inversionista, expuesto a alternativas con diferentes niveles de riesgo, preferirá aquella con el nivel de riesgo más bajo. Es la actitud hacia la tenencia de activos riesgosos en un portafolio, de manera que un inversionista con mayor aversión al riesgo demandará una prima mayor cuando considere que un instrumento posee alto riesgo.

<sup>44</sup> Los mercados donde se negocian las opciones pueden ser organizados (bolsas) o descentralizados (over the counter, OTC). Los mercados organizados ofrecen contratos estandarizados de opciones (lote, calidad, precio, vencimiento, días de liquidación, etc.). Al contrario, los mercados descentralizados ofrecen opciones hechas a la medida de las necesidades de los clientes. Actualmente, la mayoría de las opciones se negocian en mercados organizados.



El estado de la Opción también dependerá del tipo de operación que realice el decisor, existen cuatro tipos operaciones posibles, según el tipo de participación en el mercado, estas son:

### 1.- Comprar una Opción de Compra en el Mercado (Buy a Call)

Un inversionista compraría la opción de compra si estima que el precio del subyacente se incrementará en el futuro. En este caso el perfil de riesgo es limitado y conocido de pérdidas, determinado por el pago de la prima de la opción y una posibilidad desconocida e ilimitada de ganancias<sup>45</sup>.

### 2.- Vender una Opción de Compra en el Mercado (Write o Grant a Call)

Este caso es lo opuesto al anterior, aquí el vendedor de esta opción tendrá solo una ganancia limitada igual al valor de la prima, debido a que a medida que el precio del bien subyacente permanece por debajo del precio de ejercicio la opción no se ejerce. Pero si se ejerce el vendedor estará obligado a vender al precio de ejercicio que será menor al del mercado presentando la posibilidad de pérdidas ilimitadas marcadas por el riesgo base<sup>46</sup>, entre mayor sea el precio del mercado en relación al precio de ejercicio, mayor será la pérdida del inversor<sup>47</sup>.

### 3.- Comprar una Opción de Venta (Buy a Put)

Aquí el comprador de la opción paga una prima que representa la pérdida total, teniendo con esto pérdidas limitadas si el precio del activo subyacente es mayor que el precio de ejercicio. En cambio si el precio del activo subyacente es menor, el tenedor del put puede ejercer al precio de ejercicio y obtener ganancias ilimitadas hasta un máximo marcado por el precio de ejercicio menos el pago de la prima, mientras más bajo sea el precio del mercado en relación al precio de ejercicio mayores serán las ganancias.

### 4.-Vender una opción de Venta (Write o Grant a Put)

Esta es la contrapartida del caso anterior. El vendedor tiene una ganancia potencial conocida y limitada por el valor de la prima, mientras que presenta una pérdida ilimitada hasta el máximo del valor del precio de ejercicio menos el valor de la prima<sup>48</sup>.

---

<sup>45</sup> Cuando un individuo adquiere un seguro, paga una cuota de riesgo, sin conocer en algunos casos, a cuánto ascenderá el monto máximo de cobertura.

<sup>46</sup> El riesgo base se refiere a la volatilidad de la diferencia entre el precio del futuro y el precio spot de ese bien subyacente.

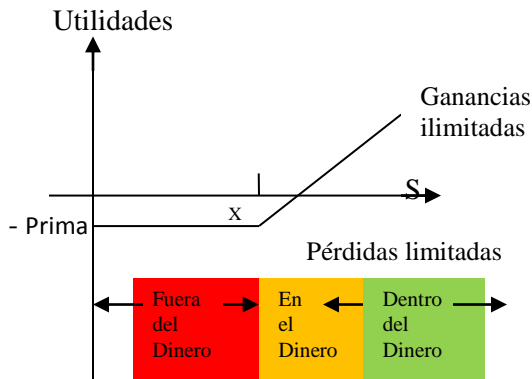
<sup>47</sup> Por esta razón las bolsas requiere que aquél que venda opciones en el mercado cuente con una calidad crediticia muy alta, y en caso de que se les pida dar un depósito como margen en el banco comprador (concepto equivalente al capital mínimo de garantía de una compañía de seguros).

<sup>48</sup> Se requiere que los vendedores hagan un depósito de margen y si el precio del activo subyacente se mueve en contra del vendedor puede requerírsele un margen adicional.

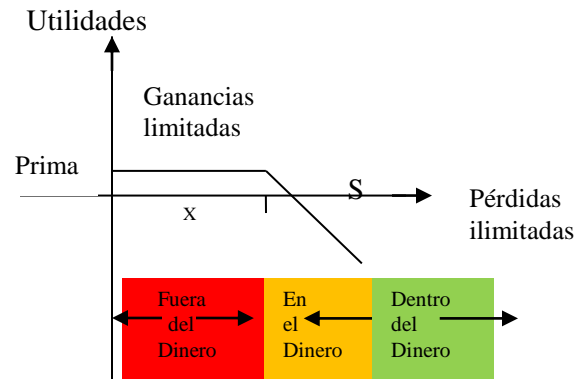
En los cuatro estados de las opciones su perfil de riesgo-rendimiento puede ser representado gráficamente como:

**Figura 2.3 Perfil Riesgo-Rendimiento**

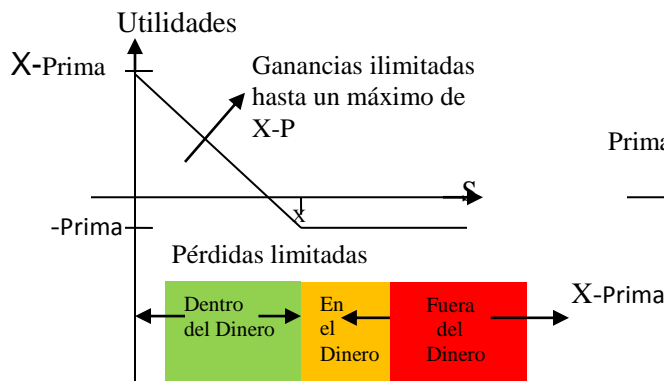
**PERFIL DE RIESGO DEL  
COMPRADOR DEL  
CALL (OPCIÓN DE COMPRA).**



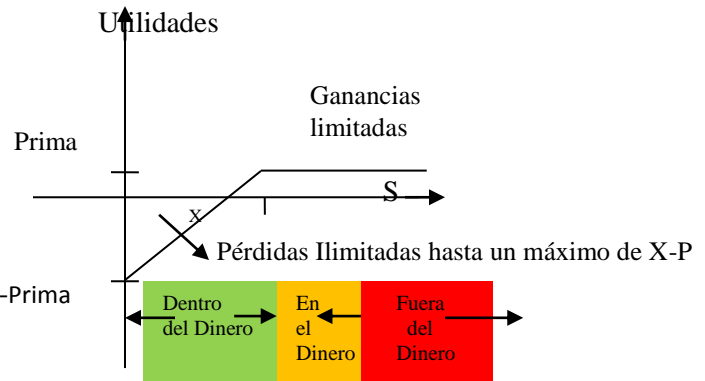
**PERFIL DE RIESGO DEL  
VENDEDOR DEL  
CALL (OPCIÓN DE COMPRA).**



**PERFIL DE RIESGO DEL  
COMPRADOR DEL  
PUT (OPCIÓN DE VENTA).**



**PERFIL DE RIESGO DEL  
VENDEDOR DEL  
PUT (OPCIÓN DE VENTA).**



### 2.2.3 Modelos de Valuación de Opciones

Un modelo es una representación simplificada de la realidad basada en ciertos supuestos que permiten limitar a un fenómeno bajo estudio en sus características más relevantes, descartando aquellas que no impactan de manera decisiva al objetivo de su análisis.

En el caso de las Opciones Financieras los modelos estarán enfocados en encontrar el valor de las opciones, marcado por la prima de la opción. Se sabe que está dado por dos componentes principales:

$$\text{Valor Total de una Opción ó Prima de la Opción} = \text{Valor Intrínseco} + \text{Valor por tiempo}$$

Donde el valor intrínseco es el valor que tendría la opción si expirara inmediatamente tomando en cuenta el precio del activo subyacente en el mercado al contado. Concretamente, es la cantidad por la cual la opción se encuentra dentro del dinero.

- Para un call: Valor intrínseco =  $\max(S - X, 0)$
- Para un put: Valor intrínseco =  $\max(X - S, 0)$

Mientras que el valor por tiempo, es el monto que los inversionistas están dispuestos a pagar por el potencial de posibles beneficios que existe cuando el precio del subyacente varía entre el presente y el vencimiento de la opción. Es la cantidad por la cual el valor total de la opción o la prima exceden el valor intrínseco, de ahí que el valor por tiempo:

- Es igual a cero al vencimiento de la opción
- El valor máximo de la opción que es ejercida es igual al valor intrínseco.
- El valor por tiempo se encuentra en su máximo valor cuando el precio del subyacente es igual al precio de ejercicio.

Una vez especificados los componentes que establecen el valor de las Opciones, es decir, cuánto debía pagarse en concepto de prima para adquirirla, deben establecerse las variables críticas que impactan de manera decisiva en el comportamiento del precio de las opciones.

Estas variables están dadas por seis factores, los cuatro primeros están relacionados con el valor intrínseco de la opción, en tanto que los dos últimos por el valor por tiempo de la opción.

1. **Precio del activo subyacente:** Es el más importante determinante. Cuando mayor es el precio del activo subyacente, mayor es el precio de la opción de compra (mayor probabilidad de encontrarse en dinero) y menor el de la opción de venta (menor posibilidad de encontrarse en dinero).
2. **Precio de ejercicio:** Cuanto más alto, más barata debe ser la opción de compra y más cara debe ser la opción de venta.

3. **Tasa de interés libre de riesgo:** A medida que la tasa libre de riesgo se incrementa, aumenta el precio de las opciones de compra y disminuye el precio de las opciones de venta.
4. **Dividendos o pagos similares:** En relación a las opciones sobre acciones, si se espera que la acción reparta altos dividendos, el valor de la opción de compra disminuye y el valor de la opción de venta aumenta.
5. **Tiempo remanente de vigencia:** Mientras mayor es el plazo que aún tiene de vigencia una opción, mayor es la posibilidad de ejercer, por lo tanto mayor será el precio de las opciones, tanto de compra como de venta. Además, mientras más largo es el plazo de vigencia, los tenedores de opciones cuentan con una mayor flexibilidad para cerrar sus posiciones.
6. **Volatilidad del activo subyacente.** Mientras más volátil es el activo subyacente, mayor es el valor de las opciones, tanto de compra como de venta.

Por último se deben establecer los supuestos generales que dan paso a los modelos; en el caso del precio del ejercicio<sup>49</sup>, los dividendos y el tiempo remanente de vigencia, si bien son fundamentales, están estipulados en el contrato en el caso de Opciones Financieras, por lo cual no es necesario suponer nada al respecto de las mismas. En el caso del precio del activo subyacente para las Opciones Financieras puede observarse directamente en el mercado y para las Opciones Reales estará determinado por el VPN del proyecto, que si bien su valor es conocido, su comportamiento futuro es incierto y está directamente relacionado con la variabilidad del mismo (el sexto factor), por lo cual deberán hacerse supuestos sobre esta variable. La volatilidad en el precio del subyacente (el valor del proyecto, en el caso de Opciones Reales) depende en gran medida del comportamiento de la tasa a la cual se puede tomar dinero prestado o colocar depósitos sin riesgo. Los supuestos que relacionan lo anterior son:

- Se pueden realizar ventas en descubierto del activo subyacente por volúmenes ilimitados sin sanción ni costo alguno.  
Una venta en descubierto implica vender un activo que no se posee, asumiendo la obligación de devolverlo luego de un periodo determinado. Esta operación sería como un préstamo del activo subyacente.
- No hay oportunidad de Arbitraje.  
Una estrategia de arbitraje es una operación mediante la cual se puede obtener una ganancia inmediata cierta, sin ningún tipo de riesgo y sin necesidad de desembolsar suma alguna, aprovechando las imperfecciones de los mercados.

---

<sup>49</sup> En el caso de Opciones Reales el precio de ejercicio será el costo de la inversión, los dividendos representarán el mantenimiento de la opción y la vigencia se estipulará como el tiempo del proyecto.

- Se puede tomar y colocar fondos por cantidades ilimitadas a la tasa libre de riesgo, la cual se considera constante a través del tiempo y para todos los vencimientos. Esto quiere decir que no existe posibilidad de insolvencia por parte del deudor. En general existe una estructura temporal de tasas de interés, a mayor plazo de colocación de depósitos corresponde una mayor tasa. Sin embargo, asumir que dicha estructura es chata (igual tasa para todos los vencimientos) no afecta de manera significativa las valuaciones que realizaremos, y los modelos presentados pueden adaptarse fácilmente.
- No hay costos de transacción, ni impuestos que afecten el precio del activo subyacente o las operaciones<sup>50</sup>. En el contexto de la valuación de una inversión real, no se necesitará comprar una opción, sino que la misma se encontrara dentro del proyecto. A su vez, los impuestos relacionados con el proyecto deberán estar incluidos en los flujos de fondo, por lo cual, a los efectos de la Valuación de la Opción Real, no son relevantes.<sup>51</sup>

Existen también los supuestos específicos de cada modelo de valuación que permiten cumplir el objetivo de encontrar el valor de las opciones. Estos modelos son variados y van desde ecuaciones diferenciales y soluciones dinámicas, hasta las simulaciones.

Sin embargo para los propósitos de esta tesis se presentará el modelo de Black & Scholes por ser por mucho el más utilizado en el mercado financiero para la valuación de derivados y el modelo Binomial por ser el idóneo en cuestiones de flexibilidad e incertidumbre, que con su aportación gráfica de escenarios se adapta a diversos marcos de aplicación.

### 2.2.3.1 Modelo de Black & Scholes

El modelo desarrollado por Fischer Black y Myron Scholes en 1972 implicó sin duda una revolución en la operación de las opciones, esto se debió a que dentro de la valuación de las opciones no es difícil encontrar su valor intrínseco, el problema es conocer su valor por tiempo (no es fácil de determinar, pues durante la vida útil de la opción el activo subyacente toma una infinidad de precios). Este problema es solucionado en este modelo al tener dentro de su definición límites de precios para las opciones y estar basado en la construcción de un portafolio de réplica.

<sup>50</sup> El lector interesado en modelos de valuación de opciones que incluyan el efecto de los costos de transacción, puede consultar los trabajos de Leland (1985) o Boyle y Vorst (1992).

<sup>51</sup> Están considerados en los Flujos de Efectivo dentro del VPN

- Supuestos específicos del Modelo:
  - En primer lugar hay que mencionar que el modelo de Black & Scholes fue desarrollado para valuar opciones europeas; es decir para opciones que sólo pueden ejercerse en su fecha de expiración.
  - Será sobre activos que no pagan dividendos durante la vigencia de la opción.
  - El precio del activo subyacente sigue un movimiento Geométrico Browniano, con un comportamiento de acuerdo con una caminata aleatoria en tiempo continuo, lo cual desemboca en que el precio del subyacente al momento del vencimiento de la opción sea una variable aleatoria con distribución log-Normal con media y desviación estándar constantes.
  - La tasa de interés permanece constante.
  - Los inversionistas son neutrales al riesgo (no tienen aversión al riesgo).
  - Supone que la negociación del activo subyacente se realiza de manera continua, lo cual implica la posibilidad de modificar el portafolio teórico que replica la opción<sup>52</sup>.

Bajo estos supuestos, el valor de la opción se obtiene mediante un portafolio de réplica teórico que se re-balancea constantemente, tantas veces como el precio del activo subyacente ( $S_0$ ) cambie. El concepto que sigue es basado en que si el portafolio de réplica se compone de  $\theta$  unidades del activo subyacente y un monto  $\Phi$  colocado a una tasa libre de riesgo, entonces su valor hoy será de:

$$V_0 = \theta S_0 + \Phi$$

Análogamente, se puede obtener el mismo resultado utilizando las probabilidades neutrales a riesgo, de esta manera el valor de una opción se obtendrá usando la esperanza matemática,  $E(V_T)$ , descontada<sup>53</sup> a una tasa de interés ( $r$ ) con capitalización continua equivalente a la tasa libre de riesgo anual ( $e^{-\delta T}$ ), que garantiza que la esperanza matemática del precio del subyacente en la fecha de expiración ( $T$ ) descontado a la tasa libre de riesgo, sea igual al precio del activo subyacente hoy:

$$V_0 = e^{-\delta T} E(V_T); \quad \text{donde } \delta = \ln(1+r)$$

<sup>52</sup> Un portafolio de réplica es un portafolio hipotético que permite eliminar la oportunidad de arbitraje a través de la lógica en la que si dos activos (portafolios de activos) tienen con seguridad el mismo valor en un momento futuro determinado, entonces necesariamente tendrán que tener el mismo valor hoy, en caso contrario existirá arbitraje. Por lo tanto el portafolio de réplica está compuesto por el activo subyacente y el activo libre de riesgo que tiene los mismos flujos de efectivo que la opción que se está evaluando. Puesto que este portafolio no tiene riesgo, su rendimiento debe ser igual a una inversión en un valor con rendimiento seguro.

<sup>53</sup> La esperanza matemática de una variable aleatoria es la suma del producto de cada valor por su probabilidad.

- Formulación del Modelo:

De acuerdo a los supuestos utilizados por el modelo, al calcular la esperanza matemática descontada expuesta anteriormente, se obtienen las fórmulas de valuación de opciones europeas usadas tanto en las Opciones Financieras como en las Opciones Reales y que representan por tanto la esencia de la metodología de Black & Scholes:

- El valor teórico de una opción de compra es:

$$C_0 = S_0 N(d_1) - X e^{-\delta t} N(d_2)$$

- El valor teórico de una opción de venta es:

$$P_0 = X e^{-\delta t} N(-d_2) - S_0 N(-d_1)$$

Donde en ambos casos de manera rigurosa:

- $S_0$  = Al precio del subyacente en el momento cero (el momento de valuación).
- $N(X)$  = La probabilidad acumulada por una distribución normal estándar hasta el valor de  $X$ .
- $d_1$  = Un parámetro que surge al calcular la esperanza matemática y queda definido por:

$$d_1 = \frac{\ln(S_0/X) + (\delta + 0.5\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

- $X$  = Al precio del ejercicio de la Opción
- $\delta$  = A la tasa de interés libre de riesgo con capitalización continua.
- $\sigma$  = La desviación estándar (volatilidad) anualizada por unidad de tiempo.
- $T$  = Es el plazo (en años) hasta el vencimiento de la opción
- $d_2$  = Es otro parámetro de la fórmula que se define como:

$$d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T}$$

Cabe señalar que la ventaja de este método consiste en que la valuación se realiza mediante fórmulas sencillas; sin embargo los hechos de que opciones solo pueden ser ejercidas en su fecha de expiración (opciones europeas) y el no considerar el pago de dividendos<sup>54</sup> se convierten en limitantes, que pueden ser superadas en el método binomial presentado a continuación, que contiene la misma lógica que el modelo de Black & Scholes, pero que lo supera en practicidad y visualización de la viabilidad del proyecto en cada periodo.

<sup>54</sup> La valuación de opciones sobre activos que pagan dividendos está basada en los aportes de Merton (1973). Los lectores interesados pueden consultar Bacchini y otros (2004) o Hull (2000).

### 2.2.3.2 Modelo Binomial

Modelo inicialmente sugerido por William Sharp y posteriormente desarrollado por Miller simultáneamente a Cox, Ross y Rubenstein en 1979. Está basado al igual que el modelo de Black & Scholes, en un portafolio de réplica con rendimientos libre de riesgo, pero a diferencia este modelo supone que la fijación de precios del subyacente sigue un proceso binomial.

Para facilitar la comprensión del modelo se expondrá primero el modelo Binomial de valuación de opciones considerando solamente un paso del mismo, por lo que no tiene sentido diferenciar entre opciones americanas y europeas.

Más adelante se generalizará el modelo para considerar la cantidad de pasos necesarios y se estudiarán por separado las opciones europeas y americanas, considerando la posibilidad de que el activo subyacente pague dividendos.

#### 2.2.3.2.1 Valor de una Opción: Un Periodo

Antes de proceder a valuar puntualmente una Opción de Compra o de Venta, se abordarán los supuestos específicos en los cuales se basa este modelo, además de los supuestos generales expuestos anteriormente en este capítulo:

- Lo que define al modelo es un esquema binomial, es decir, que solamente dos situaciones pueden darse al vencimiento de la opción<sup>55</sup>:
  - 1) El precio del activo subyacente sube (incrementa su valor/caso de alza)
  - 2) El precio del activo subyacente baja (decrece su valor/caso de baja)

Si el precio del activo subyacente en el momento en que se adquiere la opción (momento cero,  $S_0$ ), entonces el momento de vencimiento (momento uno,  $S_1$ ) el precio puede ser<sup>56</sup>:

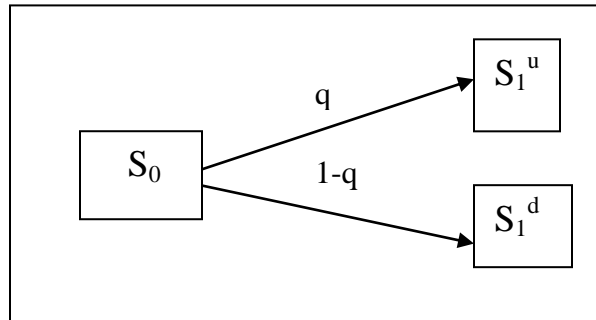
- $S_1^d$  (menor a  $S_0$ ); o
- $S_1^u$  (mayor a  $S_0$ ).

<sup>55</sup> Ambas opciones son valoradas en el siguiente momento del tiempo. Las posibles variaciones que se pueden dar en el precio del activo subyacente estarán determinadas por los seis factores explicados previamente en este apartado, el precio de la opción, precio de ejercicio, la tasa de interés libre de riesgo, el pago de dividendos el tiempo de vigencia y la volatilidad del activo subyacente.

<sup>56</sup> Los superíndices  $d$  y  $u$  se utilizan siguiendo la notación de la mayoría de los autores especializados en la materia, y provienen del inglés down y up, respectivamente.



Gráficamente el supuesto se representa mediante lo que se conoce como “árbol binomial”:



Cada posible precio del activo puede darse con una probabilidad determinada, la cual está condicionada por el valor del subyacente en el tiempo cero<sup>57</sup>. En la figura anterior, puede verse que la probabilidad de que el precio sea  $S_1^u$  es  $q$ , mientras que la probabilidad de que el precio sea  $S_1^d$  es  $1-q$ . Utilizando las probabilidades condicionales podemos escribir:

- $P(S_1 = S_1^u / S_0 = s_0) = q$       Que se lee: “La probabilidad de que  $S_1$  tome el valor de  $S_1^u$ , sabiendo que  $S_0$  tomó el valor de  $s_0$  es igual a  $q$ ”.
- $P(S_1 = S_1^d / S_0 = s_0) = 1-q$       Que se lee: “La probabilidad de que  $S_1$  tome el valor de  $S_1^d$ , sabiendo que  $S_0$  tomó el valor de  $s_0$  es igual a  $1-q$ ”.

Por conveniencia, para desarrollar el modelo de valuación, los valores al momento uno, suelen expresarse como el valor al momento cero multiplicado por una constante que indicará el porcentaje en el cual aumenta o disminuye el precio del subyacente.

Es decir que el precio:

- En el caso de alza se expresará como  $S_1^u = S_0u$

Siendo la constante  $u$  un número mayor a 1

- El precio en caso de baja  $S_1^d = S_0d$

Siendo la constante  $d$  un número entre 0 y 1.

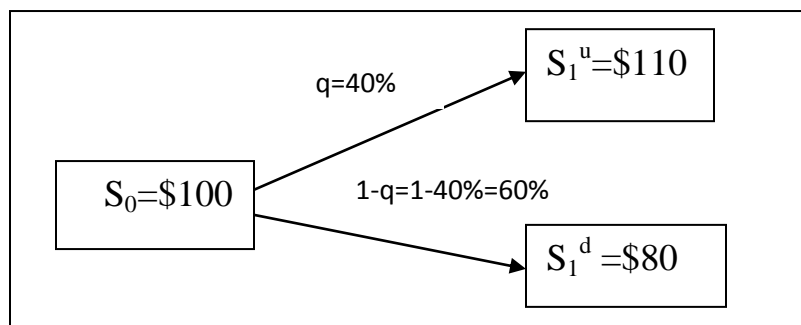
<sup>57</sup> Es importante señalar que las probabilidades asignadas a los futuros precios de las acciones, no modificará el precio de la opción.

**Ejemplo<sup>58</sup>:** Suponga que el precio del activo subyacente de una opción hoy es de \$100 y que al vencimiento de la opción puede tomar únicamente dos valores:

- Existe una probabilidad del 40% de que el precio sea de \$80
- Existe una probabilidad del 60% de que el precio sea de \$110

**Solución**

El árbol binomial para este caso sería:



Como el precio del activo subyacente es de \$100 y los posibles precios son de \$80 y \$110, entonces, esto quiere decir que se puede producir una caída del 20% o una alza del 10%. De esta manera, los valores de las constantes multiplicativas son  $d = 0.80$  y  $u = 1.10$

Las probabilidades se expresan:

- $P(S_1/S_0=0.80/S_0=100) = 0.40$
- $P(S_1/S_0=1.10/S_0=100) = 0.60$

Con este ejemplo se visualiza el concepto clave del modelo binomial, la generalización del modelo es una extensión de estos sencillos conceptos; lo que se debe tener claro es:

- **Existen solamente dos posibles valores del subyacente al vencimiento de la opción**
- **Esos dos valores se expresan en términos del precio actual multiplicado por una constante que indica el porcentaje de variación.**

Una vez estipuladas las bases, se expondrá la técnica en la que se sustentan los modelos de valuación binomiales, la creación del portafolio de réplica.

<sup>58</sup> Tomado del libro, Roberto D. Bacchini, Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, 2006.

### 2.2.3.2.2 Creación del Portafolio de Replicante

La valuación de las opciones generalmente se realiza sin una valuación directa de la opción, debido a que el valor de una opción no está determinado por el precio esperado del activo, sino por su precio actual que reflejará las expectativas a futuro. En base a esta idea se construye un portafolio que tiene exactamente el mismo valor que la opción en el momento uno, cualquiera que sea el escenario que se dé. Si este portafolio tiene el mismo valor que la opción en el momento uno, entonces, para eliminar la oportunidad de arbitraje<sup>59</sup>, necesariamente deberá valer lo mismo que la opción hoy.

Este portafolio que replica el valor de la opción en el momento uno, se denomina justamente, Portafolio Replicante, y está constituido por una cantidad del activo subyacente y con una colocación (o préstamo) a la tasa libre de riesgo. Si el portafolio de Réplica tiene exactamente el mismo valor de la opción en el momento uno, entonces el valor de la opción en el momento cero deberá ser el costo de adquirir dicho portafolio en ese momento.

Como ya se definió en el apartado de Black & Scholes de esta tesis, el valor hoy del portafolio de Réplica ( $V_0$ ) será:

$$V_0 = \theta S_0 + \Phi$$

Que será justamente el valor de la opción que es replicada por la misma.

Donde:

- $\theta$  : Representa las unidades del activo subyacente
- $S_0$ : Es el precio del subyacente en el momento cero (el momento de valuación)
- $\Phi$ : Representa el monto colocado a una tasa libre de riesgo.

Lo anterior representa un Portafolio de Réplica en su forma general, sin embargo se debe tener en cuenta para todo momento dos aspectos:

1. El modelo binomial tiene como parte fundamental la existencia de dos posibles escenarios para el precio del subyacente.
2. El objetivo de un Portafolio de Réplica siempre consistirá en determinar las cantidades de  $\theta$  y  $\Phi$  que hagan que su valor al momento uno coincida con el valor de la opción, para cualquier escenario.

Con estos aspectos podemos definir entonces los dos casos del Portafolio de Réplica aplicados para el modelo binomial en las operaciones de compra o venta, encontrar las cantidades deseadas de  $\theta$  y  $\Phi$  y con ello determinar el valor de la opción.

---

<sup>59</sup> Un negocio sin inversión, que no involucra riesgo y que entrega retornos positivos, aprovechando las imperfecciones de los mercados.

- Para el Valor de una opción de Compra:
  - Si es precio de activo subyacente en el momento uno sube, entonces el valor del Portafolio de Réplica será:

$$V_1^u = \theta S_0 u + \Phi (1+r)^T$$

- Si es precio de activo subyacente en el momento uno baja, entonces el valor del Portafolio de Réplica será:

$$V_1^d = \theta S_0 d + \Phi (1+r)^T$$

Donde, para ambos casos:

- $r$ : Es la tasa anual libre de riesgo a la cual se puede depositar o solicitar el dinero.
- $S_0$ : Es el precio del subyacente en el momento cero
- $T$ : Es el tiempo (en años) que hay hasta el vencimiento de la opción de compra.
- $u$ : Es el factor que indica el porcentaje de aumento en el precio
- $d$ : Es el factor que indica el porcentaje de disminución en el precio
- $\theta$  : Es la cantidad de subyacente que se compra en el momento cero (el momento de valuación)
- $\Phi$ : Es el monto que se deposita en el momento cero a la tasa  $r$  por el plazo  $t$

Por otra parte, el valor de la opción de compra (Call) en el momento uno está dado por su valor intrínseco (recordemos que la opción expira en dicho momento). Entonces el valor del call está dado por:

- En caso de que suba el precio del subyacente es:  $C_1^u = \max ( S_0 u - X, 0 )$
- En caso de que baje el precio del subyacente es:  $C_1^d = \max ( S_0 d - X, 0 )$

Donde en ambas expresiones,  $X$  representa el precio de ejercicio de la opción de compra. De esta manera si se pretende que el Portafolio Replique el valor de la opción, entonces las siguientes ecuaciones se deben cumplir:

$$V_1^u = C_1^u \quad \text{y} \quad V_1^d = C_1^d$$

Para lograr el objetivo de encontrar los valores de  $\theta$  y  $\Phi$ , se reemplazan los valores de los portafolios por sus expresiones correspondientes:

$$\theta S_0 u + \Phi (1+r)^T = C_1^u \quad \text{y} \quad \theta S_0 d + \Phi (1+r)^T = C_1^d$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$\theta = \frac{C_1^u - C_1^d}{S_0(u-d)} \quad \text{y} \quad \Phi = \frac{uC_1^d - dC_1^u}{(u-d)(1+r)^T}$$

Si armamos un portafolio con estas cantidades, obtendremos el valor de la opción en el momento uno, por lo cual, el costo de este portafolio será el valor de la opción de compra en el momento cero. Entonces podemos concluir diciendo que el valor de una opción de compra es igual al costo del portafolio que replica su comportamiento:  $C_0 = V_0 = \theta S_0 + \Phi$

- Para el Valor de una opción de Venta:

Para el caso de las opciones de venta se procede de la misma manera que con las opciones de compra, construir un portafolio compuesto por  $\varphi$  unidades del activo subyacente y un monto  $\eta$  depositado a la tasa libre de riesgo, de manera tal que el valor de este portafolio coincida con el valor de la opción de venta en los dos escenarios posibles.

En comparación con el apartado anterior, lo único que se modifica en la metodología es el valor de la opción en el momento uno. Para el caso de una opción de Venta (Put), y recordando que la opción vence en el momento uno, los posibles valores del contrato en dicho momento serán su valor intrínseco:

- En caso de que suba el precio del subyacente es:  $p_1^u = \max ( X - S_0u, 0 )$
- En caso de que baje el precio del subyacente es:  $p_1^d = \max ( X - S_0d, 0 )$

Donde de la misma manera que en un Call para ambas expresiones, X representa el precio de ejercicio de la opción de compra. Por lo que si se pretende que el Portafolio Replique el valor de la opción, también se deben cumplir:

$$V_1^u = p_1^u \quad \text{y} \quad V_1^d = p_1^d$$

Reemplazando los valores de los portafolios por sus expresiones correspondientes:

$$\varphi S_0u + \eta (1+r)^T = p_1^u \quad \text{y} \quad \varphi S_0d + \eta (1+r)^T = p_1^d$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$\varphi = \frac{\rho_1^u - \rho_1^d}{S_0(u-d)} \quad \text{y} \quad \eta = \frac{u\rho_1^d - d\rho_1^u}{(u-d)(1+r)^T}$$

Finalmente, el valor de la cartera al momento cero debería coincidir con el valor de la opción de venta para evitar las oportunidades de arbitraje. Por lo tanto el valor de una opción de venta es igual al costo del portafolio que replica su comportamiento<sup>60</sup>:

$$p_0 = V_0 = \varphi S_0 + \eta$$

Aquí se concluye con la técnica del Portafolio de Réplica. Sin embargo antes de hacer la generalización del modelo Binomial para n-periodos, como se mencionó al momento de explicar el modelo de Black & Scholes , existe análogamente a la técnica del Portafolio de Réplica, otra técnica donde se puede obtener el mismo resultado, utilizando las probabilidades neutrales a riesgo, esta técnica se presentará a continuación.

<sup>60</sup> Note que las únicas diferencias con las fórmulas correspondientes a las Opciones de Compra están dadas por los posibles valores de la opción en el momento uno.

### 2.2.3.2.3 Valuación Neutral a Riesgo

La técnica de Valuación Neutral a Riesgo calcula el valor de una Opción como una esperanza matemática descontada<sup>61</sup>. Esta esperanza matemática se calcula con los posibles valores que puede tomar la opción en el momento uno y con una probabilidades llamadas neutrales a riesgo que se denotarán con la letra  $q$ . Estas probabilidades harán que la esperanza matemática del precio del subyacente al momento uno, descontada a una tasa de interés libre de riesgo, sea igual al precio del activo subyacente hoy. Es decir, bajo el modelo binomial de un paso, donde los posibles precios del activo al momento final son  $S_1^u$  y  $S_1^d$ , lo mencionado se expresa como:

$$S_0 = \frac{E_Q(S_1 / S_0 = s_0)}{(1+r)^T} = \frac{s_1^u q + s_1^d (1-q)}{(1+r)^T}$$

En la expresión anterior está implícito que  $q$  es la probabilidad (neutral a riesgo) de que el precio suba a  $S_1^u$  en el momento uno, mientras que su complemento  $(1-q)$  es la probabilidad asociada a una caída en el precio hasta  $S_1^d$ . Por lo que para conocer dicha probabilidad simplemente podemos despejarla de la fórmula anterior, quedando:

$$q = \frac{S_0(1+r)^T - s_1^d}{s_1^u - s_1^d}$$

A su vez, considerando el supuesto de que los posibles precios del subyacente en el momento uno se pueden expresar en términos del precio en el momento cero ( $S_1^u = S_0u$  y  $S_1^d = S_0d$ ), podemos expresar la probabilidad neutral al riesgo como:

$$q = \frac{S_0(1+r)^T - S_0d}{S_0u - S_0d}$$

Simplificando el precio en el momento inicial, se obtiene la siguiente expresión que define la probabilidad neutral a riesgo en un modelo binomial:

$$q = \frac{(1+r)^T - d}{u - d}$$

Por lo que para calcular el valor de la opción, simplemente calculamos la esperanza matemática en el momento uno, con estas probabilidades y la descontamos a la tasa libre de riesgo, quedando:

$$V_0 = \frac{E_Q(V_1)}{(1+r)^T}$$

<sup>61</sup> Como ya se definió anteriormente, la esperanza matemática se obtiene con la suma de cada valor multiplicado por su probabilidad.

De la misma manera que en el portafolio de Réplica, podemos puntualizar los casos de opciones de compra y venta para determinar el valor de la opción, de la siguiente manera:

- Para el Valor de una opción de Compra:

En el caso de las opciones de Compra (Call), la formula expuesta anteriormente se traduce en:

$$c_0 = \frac{c_1^u q + c_1^d (1-q)}{(1+r)^T}$$

- Para el Valor de una opción de Venta:

La fórmula de Valuación Neutral a Riesgo para el caso de las Opciones de Venta (Put) es:

$$\rho_0 = \frac{\rho_1^u q + \rho_1^d (1-q)}{(1+r)^T}$$

**Ejemplo:** Considere un Call con precio de ejercicio igual a \$30 y vencimiento en 5 meses. Asuma que se puede depositar o pedir prestado sin riesgo por 5 meses a una tasa anual del 6.5%. A su vez, suponga que el precio de subyacente hoy es de \$32 y que los posibles precios del subyacente luego de los 5 meses (al momento uno) son de \$36.80 y \$27.20. Determinar el valor de la opción de compra.

### **Solución**

- Obteniendo datos del enunciado:

$$S_0 = \$32$$

$$X = \$30$$

$$T = 5 \text{ meses que anualmente representa } 5/12$$

- Para calcular los valores de u y d respectivamente:

$$S_1^u = S_0 u \\ \$36.80 = \$32u \quad \text{por lo tanto} \quad u = \$36.80 / \$32 = 1.15\%$$

$$S_1^d = S_0 d \\ \$27.20 = \$32d \quad \text{por lo tanto} \quad d = \$27.20 / \$32 = 0.85\%$$

$$r = 6.5\% = 0.065$$

- De los datos, se calcula los posibles valores de la opción al momento uno:

$$C_1^u = \max ( S_0u-X, 0)$$

$$C_1^d = \max ( S_0d-X, 0)$$

$$C_1^u = \max ( 32(1.15)-30, 0)$$

$$C_1^d = \max ( 32(0.85)-30, 0)$$

$$C_1^u = \$6.80$$

$$C_1^d = {}^{62}\$0$$

- La probabilidad de alza neutral a riesgo:

$$q = \frac{(1+r)^T - d}{u-d} = \frac{(1+0.065)^{5/12} - 0.85}{1.15 - 0.85} = 0.5886$$

- Por último el valor de la Opción es:

$$c_0 = \frac{c_1^u q + c_1^d (1-q)}{(1+r)^T}$$

$$c_0 = \frac{6.80(0.5886) + 0(1-0.5886)}{(1+0.065)^{5/12}}$$

$$C_0 = \$3.8988$$

Con el ejemplo se ha visualizado la analogía existente, comprobado la equivalencia que se da entre la técnica del Portafolio de Réplica y esta técnica, por lo que de aquí en adelante se utilizará únicamente la Valuación Neutral a Riesgo<sup>63</sup>.

Con esto se concluye el modelo Binomial de un paso para valorar opciones, a continuación se presentará el modelo Binomial para más pasos y como se mencionó previamente se mostrará el análisis de las opciones europeas y americanas así como los casos con pago de dividendos.

<sup>62</sup> De la misma manera que en el ejemplo del Portafolio de Réplica, aquí la operación de  $C_1^d = \max ( 32(0.85)-30, 0)$  arrojan un valor negativo igual a  $-\$2.8$ , sin embargo no deben tomarse números negativos y a cambio se sustituirá por  $\$0$ .

<sup>63</sup> Debido a los propósitos de esta tesis y los datos proporcionados para la realización de la misma.



#### 2.2.3.2.4 Valor de la Opción: Para N Periodos (Generalizado)

Ya que se ha explicado la esencia del modelo Binomial, se comenzarán puntualizando los dos supuestos específicos, que forman la base para la construcción de un árbol binomial con más de un periodo:

- Para generalizar el modelo Binomial, simplemente se dividirá el plazo hasta el vencimiento de la opción, T, en n periodos de igual longitud:

$$\Delta t = T/n$$

- Cada periodo tendrá un comportamiento como el descrito con anterioridad en el modelo Binomial de un solo paso, con la condición de que la multiplicación de las constantes u y d que indican el porcentaje en el cual aumenta o disminuye el precio del subyacente debe ser igual a 1.

El hecho de que la multiplicación de las constantes u y d sea equivalente a uno, se establece para que un decremento en el precio compense exactamente a un incremento, y viceversa. De esta manera, en el momento dos será posible obtener un precio similar al del momento inicial. En este caso decimos que el árbol recombina.

**Ejemplo:** Considere un activo cuyo valor en el mercado es \$60, y en base a pronósticos se puede deducir que el precio puede caer a una  $d=0.80$  puede aumentar a una  $u=1.25$ . Se desea conocer los posibles valores que tomará el activo al cabo de un mes.

#### Solución

- Para establecer periodos de igual longitud, el plazo de un mes ( $T=1/12$ ) puede dividirse en dos periodo quincenales ( $n=2$ ) :

$$\Delta t = T/n = 1/12/2 = 1/24$$

- Para cada periodo de quince días, se debe considerar un paso del modelo binomial. Entonces al cabo de la primera quincena, los posibles precios serán:

El precio del activo sube:  
 $S_1^u = S_0 u = 60(1.25) = \$75$

El precio del activo baja:  
 $S_1^d = S_0 d = 60(0.80) = \$48$

- Finalmente para conocer los posibles precios del activo al cabo de un mes (valor de la segunda quincena) se debe partir de los valores obtenidos en la quincena anterior:

El precio del activo subió en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u = (S_0 u)u = 75(1.25) = \$93.75$

- El precio baja :  $S_2^d = (S_0 d)d = 75(0.80) = \$60$

El precio del activo bajó en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u = (S_0 u)u = 48(1.25) = \$60$

- El precio baja :  $S_2^d = (S_0 d)d = 48(0.80) = \$38.40$

Del ejemplo, se observan dos aspectos relevantes que deben ser considerados en la construcción de un árbol binomial:

- 1) Los resultados del periodo siguiente siempre tendrán origen en el periodo anterior; de manera tal que, en el caso inverso (en dónde se necesite deducir el precio actual a partir de los posibles precios futuros generados) se pueda obtener a partir del regreso de las ramas del árbol.
- 2) A partir del segundo periodo existirá la repetición de resultados, generando el fenómeno de recombinación y además la parte central del árbol<sup>64</sup> siempre coincidirá con  $S_0$ ; es decir con el valor actual del activo subyacente.

Hay que tener presente que cuantos más sean los periodos, también más pequeños serán los parámetros  $u$  y  $d$ . Estos valores están directamente relacionados con la volatilidad del precio del activo subyacente (volatilidad del proyecto, en el caso de Opciones Reales). Cuanto más grande es la volatilidad mayor será la amplitud del árbol, ya que los posibles valores del subyacente estarán más dispersos.

En base a lo previamente mencionado estos parámetros, son expresados, como:

- $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$
- $d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$

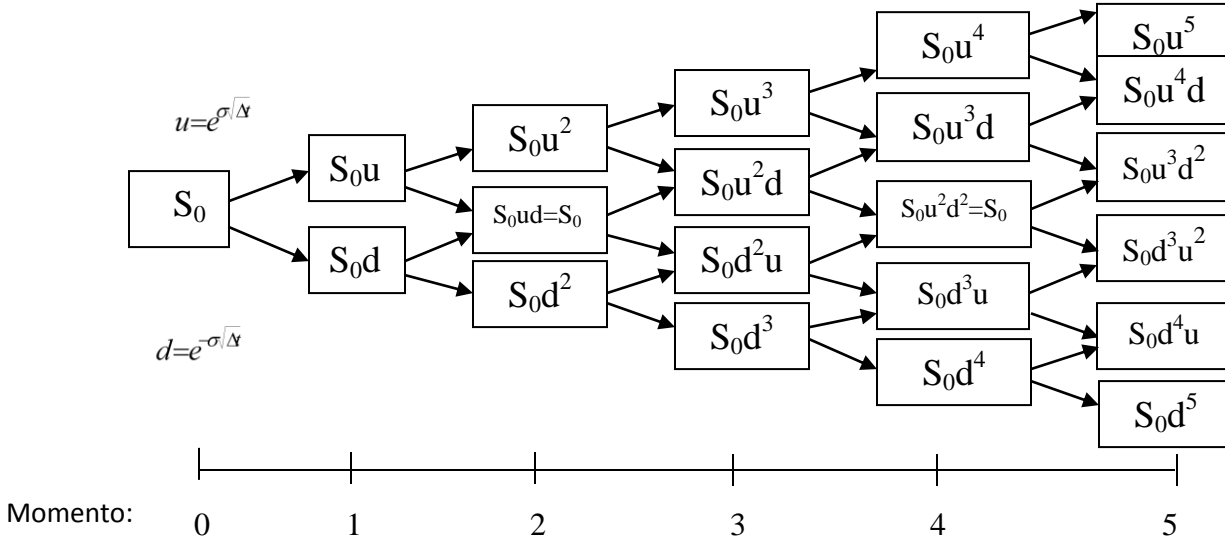
De manera tal que si aumentamos el número de pasos,  $n$ , entonces la longitud de cada periodo,  $\Delta t$ , será más chica, ya que  $\Delta t = T/n$ . En el límite, cuando  $n \rightarrow \infty$ , cada paso tendrá una longitud infinitesimal y el valor de la opción obtenido sería exacto<sup>65</sup>.

Teniendo todos los elementos definidos, se puede ilustrar la evolución del valor del activo subyacente según un Modelo Binomial; así como el proceso inverso de la valoración de la prima de la opción; este último se mostrará para una opción de compra debido a los fines de esta tesis y a que se han explicado previamente que en las opciones de venta se procede de la misma manera que con las opciones de compra, aplicando las modificaciones debidas que el proceso de un Put requiere y que ya se han explicado en este apartado.

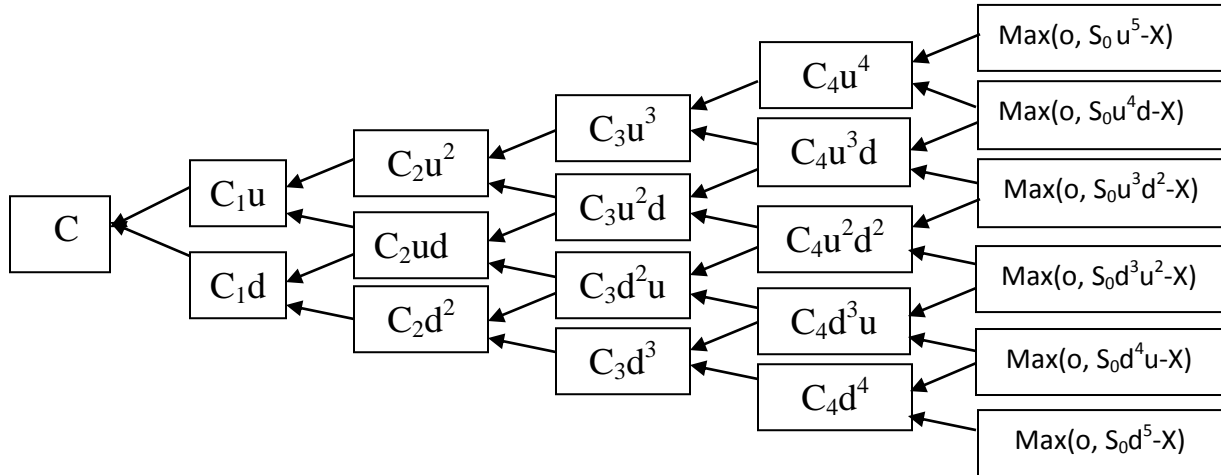
<sup>64</sup> La parte central de un árbol binomial, se dará siempre en el punto medio de los periodos pares.

<sup>65</sup> Roberto D. Bacchini, Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, 2006.

**Figura 2. 4 Evolución del Activo Subyacente descrito en un Modelo Binomial<sup>66</sup>:**



**Valoración de la Prima de la Opción de Compra descrita en un Modelo Binomial:**



<sup>66</sup> Se han seleccionado cinco periodos para ejemplificar el árbol binomial, con el objetivo de mostrar al lector de este trabajo el comportamiento del precio del activo en periodos pares e impares; y se espera que con los conceptos dados hasta ahora, se tenga la capacidad de poder estructurar el árbol hasta  $n$  periodos. Si aun así se presentara algún conflicto, se puede recurrir al libro de Mascareñas y Lamothe, Opciones Reales y Valoración de Activos, Prentice Hall, 2005. Que define una fórmula general para ambos casos:

Evolución del Activo Subyacente:  $C = \frac{1}{r^n} \sum_{j=0}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j (1-p)^{n-j} C_j$ ;  $p = \frac{r-d}{u-d}$ ;  $r$  = tasa de

interés libre de riesgo y  $C_j = \text{Max}(u^j d^{n-j} S_0 - X, 0)$  con  $n$  = número de pasos.

Valoración de la Prima de la Opción de Compra:  $C_{t-1} = r^{-1} (p * C_{tu} + (1-p) * C_{td})$

#### 2.2.3.2.4.1 Valuación de Opciones Europeas

Al valorar opciones usando un paso del modelo binomial, se calculaba el valor esperado en el momento uno (calculado con las probabilidades neutrales al riesgo) y luego, se descontaba el resultado a la tasa libre de riesgo. Los posibles valores al momento uno eran conocidos, debido a que en la fecha de expiración el valor de la opción es simplemente su valor intrínseco.

Para el caso de dos pasos, los valores en el momento dos serán conocidos (el valor intrínseco para cada posible precio del subyacente). Con estos valores, se puede calcular los posibles precios de la opción en el momento uno, utilizando la técnica de un paso, siendo la probabilidad:

$$q = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d}$$

Donde  $\Delta t = T/n$  sigue siendo la longitud de cada periodo o paso del árbol binomial. Luego, con los valores de la opción en cada escenario del momento uno, se pueden realizar cálculos del valor teórico en el momento inicial:

$$C_{n-1} = \frac{C_n q + C_n (1-q)}{(1+r)^{\Delta t}}$$

Para la cual  $n$  es el número de periodos. En una opción de venta, la metodología es similar, con la única diferencia en el cálculo del valor intrínseco al vencimiento.

**Ejemplo:** El precio de un activo actual es de \$60 y evoluciona de acuerdo a un Modelo Binomial, considerando dos pasos con  $u=1.25$ ,  $d=0.80$ ,  $\Delta t = 1/24$  años y una tasa libre de riesgo del 5%. Entonces la probabilidad de alza neutral a riesgo es:

$$q = \frac{(1+0.05)^{1/24} - 0.80}{1.25 - 0.80} = 0.449$$

Considere un Call lanzado sobre el activo en cuestión, con precio de ejercicio de \$58 y vencimiento en un mes. El valor de la opción al momento dos (después de dos quincenas) será simplemente el valor intrínseco para cada uno de los posibles precios del activo, que dependiendo del escenario, son<sup>67</sup>:

Caso 1: Al final del mes se producen dos alzas, de \$93.75; entonces el valor del Call:

$$C_{2;uu} = \max(S-X, 0) = \max(93.75-58, 0) = \$35.75$$

Caso 2: Al final del mes se producen un alza y una baja, el precio luego de un mes sería \$60

<sup>67</sup> Si existe alguna duda en el origen de los precios estipulados para las alzas y bajas, consulte el ejemplo expuesto para el modelo binomial generalizado, para  $N$  periodos.

entonces el valor del Call:  $C_{2;ud} = \max(S-X, 0) = \max(60-58, 0) = \$2$

Caso 3: Al final del mes se producen dos bajas de \$38.40, entonces el valor del Call:

$$C_{2;dd} = \max(S-X, 0) = \max(38.40-58, 0) = \$0$$

Con estos valores del momento dos, se utiliza la técnica de un paso para determinar los valores en el momento uno. Para ello se divide el árbol en ramas que representan modelos de un paso. Si el precio del subyacente en el momento uno es  $S_1^u = S_0u = 60(1.25) = \$75$  entonces sólo hay dos posibles resultados (\$93.75 ó \$60). Los valores intrínsecos correspondientes son: \$35.75 y \$2, y con estos valores se determina el valor de la opción en el nodo superior del momento uno:

$$C_{n-1} = \frac{C_n q + C_n (1-q)}{(1+r)^{\Delta t}}$$

$$C_{1;u} = \frac{C_{2;uu}q + C_{2;ud}(1-q)}{(1+r)^{\Delta t}} = \frac{(35.75)(0.449) + (2)(1-0.449)}{(1+0.05)^{1/24}} = \$17.12$$

Por otra parte si en la primera quincena, el precio del subyacente es  $S_1^d = S_0d = 60(0.80) = \$48$ , los únicos posibles valores después de un mes solo serán \$60 ó \$38.4; con valores intrínsecos de \$2 y \$0 respectivamente. Por lo que el valor del nodo inferior del momento 1:

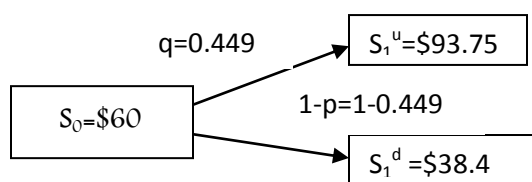
$$C_{1;d} = \frac{C_{2;du}q + C_{2;dd}(1-q)}{(1+r)^{\Delta t}} = \frac{(2)(0.449) + (0)(1-0.449)}{(1+0.05)^{1/24}} = \$0.90$$

Y siguiendo con esta metodología para el momento cero; el valor del Call será:

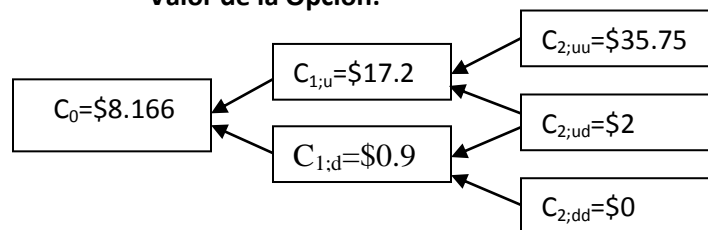
$$C_0 = \frac{C_{1;u}q + C_{1;d}(1-q)}{(1+r)^{\Delta t}} = \frac{(17.12)(0.449) + (0.90)(1-0.449)}{(1+0.05)^{1/24}} = \$8.166$$

Representación del Árbol Binomial:

**Precio del Subyacente:**



**Valor de la Opción:**



Para la valuación de opciones europeas para  $n$  periodos, solo se sigue el mismo razonamiento planteado para dos pasos, de manera tal que si el plazo de la opción se divide en  $n$  periodos, al momento del vencimiento (momento  $n$ ) se tendrán  $n+1$  posibles precios para el subyacente y en consecuencia,  $n+1$  valores intrínsecos de la opción correspondiente. Con estos valores del momento final, se calculan los  $n$  posibles valores de la opción del momento anterior, ya que para cada precio del subyacente del momento  $n-1$  solamente puede ocurrir que el precio suba o baje. Basado en esto se calculan los posibles valores de la opción al momento  $n-2$  y así sucesivamente hasta llegar al valor en el momento inicial, que será el valor teórico deseado.

#### 2.2.3.2.4.2 Valuación de Opciones Americanas

La valuación de las opciones americanas mediante el Modelo Binomial, es exactamente análoga a la metodología usada para valorar opciones europeas, teniendo así el mismo valor de probabilidad:

$$q = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d}$$

Sin embargo la naturaleza de las opciones americanas en donde se puede ejercer la opción en cualquier momento, que a diferencia de las europeas que solo se pueden ser ejercidas al momento del vencimiento de la opción, propicia que en cada nodo del árbol se deba verificar si es conveniente o no ejercer la opción en ese momento, teniendo como alternativa el mantenerla otro periodo, que será evaluado bajo el mismo criterio, y así sucesivamente inclusive hasta la fecha de vencimiento de la opción.

En caso de que el valor que se obtiene por ejercicio supere al valor calculado, será óptimo ejercer la opción y el precio que tomará será simplemente su valor intrínseco, en caso contrario deberá mantenerse la opción un periodo más. Es decir que el valor de la opción en el nodo correspondiente es:

$$V_t = \max(\text{ejercer}, \text{mantener})$$
$$V_t = \max(\text{valor intrínseco}, \frac{v_{t+1}^u q + v_{t+1}^d (1-q)}{(1+r)^{\Delta t}})$$

De dicha expresión, la parte de ejercer representa de manera genérica el valor intrínseco, debiendo reemplazarse la misma por las correspondientes a los Calls o Puts, según sea el caso. A su vez los elementos  $\Delta t$ ,  $q$ ,  $u$  y  $d$  serán los mismos definidos en las opciones europeas y los subíndices  $t$  y  $t+1$  serán el momento correspondiente al nodo en que se desea conocer el valor de la opción y el momento siguiente, respectivamente.

**Ejemplo:** Se tiene una opción de venta americana, con vencimiento a dos meses ( $T=2/12$ ), donde el precio del activo subyacente es actualmente \$10 y el precio de ejercicio está marcado en el mismo valor. El precio de dicho activo evoluciona conforme a un modelo binomial, con  $n=2$ ,  $r=5\%$ ,  $u=1.12$  y  $d=0.90$ .

Por lo tanto, para el primer periodo los posibles precios serán:

El precio del activo sube:  
 $S_1^u = S_0u = 10(1.12) = \$11.20$

El precio del activo baja:  
 $S_1^d = S_0d = 10(0.90) = \$9$

- El precio del activo en el segundo periodo:

El precio del activo subió en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u = (S_0u)u = 11.20(1.12) = \$12.54$
- El precio baja :  $S_2^d = (S_0d)d = 11.20(0.90) = \$10$

El precio del activo bajó en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u = (S_0u)u = 9(1.12) = \$10$
- El precio baja :  $S_2^d = (S_0d)d = 9(0.90) = \$8.1$

El valor que tomará la opción al vencimiento es:

Caso 1: Al final del mes se producen dos alzas, de \$12.54; entonces el valor del Put:

$$v_{uu} = \max(X - S, 0) = \max(10 - 12.54, 0) = \$0$$

Caso 2: Al final del mes se producen un alza y una baja, el precio luego de un mes sería \$10

$$\text{entonces el valor es: } C_{2,ud} = \max(X - S, 0) = \max(10 - 10, 0) = \$0$$

Caso 3: Al final del mes se producen dos bajas de \$8.1, entonces el valor del Put:

$$C_{2,dd} = \max(X - S, 0) = \max(10 - 8.1, 0) = \$1.9$$

De acuerdo a los parámetros y con  $\Delta t = T/n = \frac{2/12}{2} = 1/12$ , la probabilidad es:

$$q = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d} = \frac{(1+0.05)^{1/12} - 0.90}{1.12 - 0.90} = 0.473$$

Con esta probabilidad y los valores al vencimiento; calculamos el valor de mantener la opción al momento uno y lo comparamos con la opción de ejercer, tomado como valor de la opción el máximo entre ambos:

En el nodo superior, donde el precio del subyacente es \$11.20:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

$$V_2 = \max(10 - 11.20, \frac{0(0.473) + 0(1 - 0.473)}{(1 + 0.5)^{1/12}}) = \max(-1.2, 0) = \$0$$

En el nodo inferior, donde el precio del subyacente es \$9:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

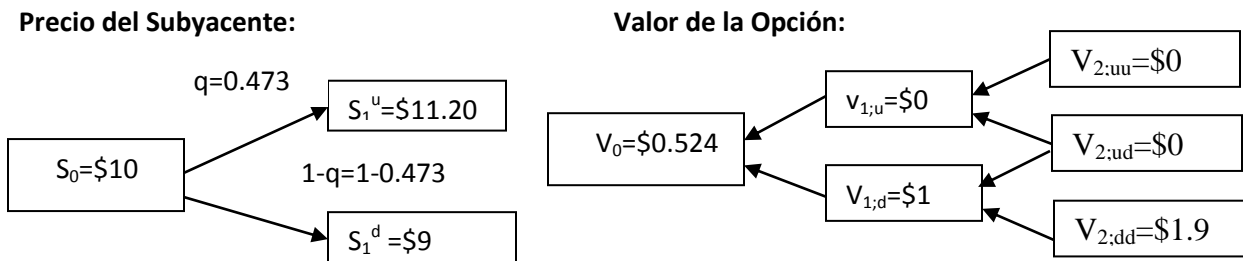
$$V_t = \max(10 - 9, \frac{0(0.473) + 1.9(1 - 0.473)}{(1 + 0.5)^{1/12}}) = \max(1, 0.99) = \$1$$

Por último el valor de la opción al momento cero, será:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

$$V_t = \max(10 - 10, \frac{0(0.473) + 1(1 - 0.473)}{(1 + 0.5)^{1/12}}) = \max(0, 0.524) = \$0.524$$

Representación del Árbol Binomial<sup>68</sup>:



<sup>68</sup> Del ejemplo podemos concluir que en las opciones de venta americanas se presentan ocasiones donde el ejercicio anticipado resulta conveniente. Pero es importante mencionar que para las opciones de venta sobre activos que no pagan dividendos, nunca es conveniente ejercer de manera anticipada y el valor coincide con el de la opción correspondiente europea, ver Merton, 1973.



### 2.2.3.2.4.3 Valuación de Activos con Dividendos

El pago de dividendos o de otros derechos en efectivo puede considerarse como una fuga de flujos de efectivos. Concretamente el pago de dividendos causará un porcentaje de baja en el precio del activo subyacente en una cantidad igual al pago de dividendos. Aquí se considerarán solamente depósitos periódicos, donde la fecha de pago de cada uno de ellos coincide con los pasos del modelo binomial.

Por lo tanto la única modificación que se realiza en cuanto al caso sin dividendos es la reducción en el valor del activo en el porcentaje estipulado por el dividendo. De este modo si  $K$  representa dicho porcentaje, en cada nodo el precio del subyacente será:

$$S_t(1-K)$$

Ante esto, el valor de un call será una función decreciente del monto esperado de los pagos de dividendos, mientras que el valor de un put representará una función creciente. En consecuencia:

- Cuando un inversionista tiene un put in the Money sobre un activo en un periodo con tasas de interés altas, la prima del tiempo del put puede ser menor que la ganancia potencial de ejercer el put anticipadamente y ganar interés sobre el precio del ejercicio.
- Cuando el activo subyacente paga grandes dividendos reducirá el valor del call y bajo estas circunstancias las opciones call pueden ejercerse justo antes de una fecha anterior a la entrega de dividendos, si la prima de tiempo de las opciones es menor que la disminución esperada en el valor del activo a consecuencia del pago de tal dividendo. Es decir que el procedimiento para una opción de compra resulta conveniente si se ejerce de manera anticipada con un alto porcentaje en pago, de lo contrario vale la pena el análisis.

**Ejemplo:** El precio de un activo en el mercado es de \$70 y evoluciona de acuerdo a un Modelo Binomial, considerando dos pasos con  $u=1.25$ ,  $d=0.80$  y  $X= \$68$ , se desea conocer el valor de un Call americano al momento cero, con  $\Delta t = 1/24$  años a una tasa libre de riesgo del 5%. Supóngase que el activo paga un dividendo quincenal igual al 2% del valor del activo.

#### **Solución**

- Al momento uno, los posibles precios serán:

El precio del activo sube:

$$S_1^u(1-K) = S_0u(1-k) = 70(1.25)(1-2\%) = \$85.75$$

El precio del activo baja:

$$S_1^d(1-k) = S_0d(1-k) = 70(0.80)(1-2\%) = \$54.88$$

- El precio del activo en el segundo momento:

El precio del activo subió en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u(1-k)$  :  
 $(S_0u)u(1-k) = 85.75(1.25)(1-2\%) = \$105.04$
- El precio baja :  $S_2^d(1-k)$ :  
 $(S_0d)d(1-k) = 85.75(0.80)(1-2\%) = \$67.228$

El precio del activo bajó en el periodo anterior, a partir de este hecho:

- El precio sube:  $S_2^u(1-k)$ :  
 $(S_0u)u(1-k) = 54.88(1.25)(1-2\%) = \$67.228$
- El precio baja :  $S_2^d(1-k)$   
 $(S_0d)d(1-k) = 54.88(0.80)(1-2\%) = \$43.025$

El valor que tomará la opción al vencimiento es:

Caso 1: Al final del mes se producen dos alzas, de \$105.04; entonces el valor del Call:

$$v_{uu} = \max(S-X, 0) = \max(105.04-68, 0) = \$37.4$$

Caso 2: Al final del mes se producen un alza y una baja, entonces el valor del Call:

$$C_{2;ud} = \max(S-X, 0) = \max(67.228-68) = \$0$$

Caso 3: Al final del mes se producen dos bajas de \$43.025, entonces el valor del Call:

$$C_{2;dd} = \max(S-X, 0) = \max(43.025-68, 0) = \$0$$

De acuerdo a los parámetros y con  $\Delta t = T/n = \frac{1/12}{2} = 1/24$ , la probabilidad es:

$$q = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u-d} = \frac{(1+0.05)^{1/24} - 0.80}{1.25 - 0.80} = 0.448$$

En el nodo superior, donde el precio del subyacente es \$85.75:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

$$V_2 = \max(87.75 - 68, \frac{37.4(0.448) + 0(1 - 0.448)}{(1 + 0.5)^{1/24}}) = \max(19.75, 16.72) = \$19.75$$

En el nodo inferior, donde el precio del subyacente es \$54.88:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

$$V_1 = \max(54.88 - 68, \frac{0(0.448) + 0(1 - 0.448)}{(1 + 0.5)^{1/24}}) = \max(-13.12, 0) = \$0$$

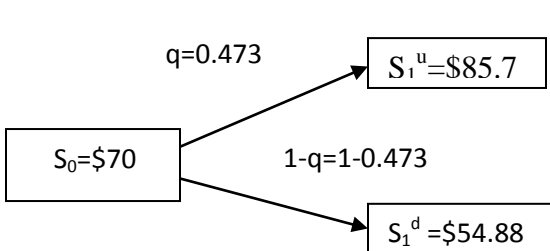
Por último el valor de la opción al momento cero, será<sup>69</sup>:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

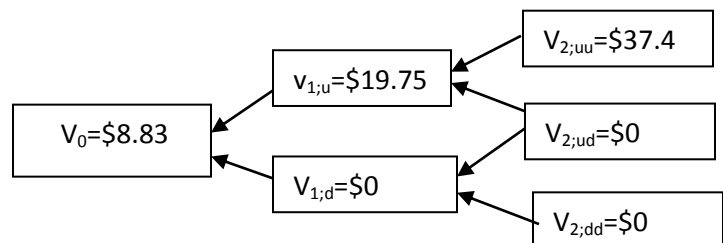
$$V_0 = \max(70 - 68, \frac{19.75(0.448) + 0(1 - 0.448)}{(1 + 0.5)^{1/24}}) = \max(2, 8.83) = \$8.83$$

Representación del Árbol Binomial:

**Precio del Subyacente:**



**Valor de la Opción:**



<sup>69</sup> Con este ejemplo se concluyen las variantes del Modelo Binomial, para mayor profundidad en el tema se invita al lector de esta tesis a consultar, Bacchini, R.D; Míguez, D.F; García Fronti, Ingeniería Financiera, Futuros y Opciones, Omicron System, 2004.

### ***2.2.3.3 Ventajas del Modelo Binomial***

El modelo Binomial es un modelo discreto de tiempo para movimiento de precio de un activo, que al incluir un intervalo entre movimientos, evalúa las posibilidades de variación que puede sufrir una acción o inversión en su próximo periodo, reflejando así los valores posibles que tomará la opción en términos de un gran número de entradas. Esto es quizá la principal ventaja del Modelo Binomial ante otros modelos, incluyendo Black&Scholes, en el cual cuando la distribución límite es la normal, asume que el proceso es continuo y no existirán saltos en los precios del activo<sup>70</sup>.

Las posibilidades de variación en el Modelo Binomial, al ser proyectadas de manera gráfica a través de un árbol con nodos para cada momento en el futuro, permite la comparación continua de beneficios ante pérdidas y le brinda al decisor la posibilidad de seguir, modificar, aplazar o abandonar cualquier proyecto, esta posibilidad hace que el Modelo Binomial venza las limitantes de flexibilidad y riesgo o incertidumbre que eran el principal problema de las metodologías explicadas en el capítulo uno.

Además el árbol binomial que se construye con este método permite incorporar varias Opciones Reales en un mismo punto de decisión o incertidumbre y con ello calcular cuál de ellas genera mayor beneficio y por tanto seleccionar la más óptima, mientras que con otras técnicas de valuación tomando nuevamente en consideración el modelo de Black&Scholes, solo se obtiene el valor de una opción de manera individual requiriendo de un proceso más complicado para combinarlas con las opciones alternativas restantes.

Por último el Modelo Binomial permite un ajuste directo para el caso del pago de dividendos o cualquier otro cargo y es el que mejor se adecua a distintos escenarios de aplicación por su simplicidad, grafismo, practicidad y ajuste a las necesidades de cada proyecto<sup>71</sup>.

---

<sup>70</sup> Es por esta razón que el Modelo de Black&Scholes es considerado un caso limitante del Modelo Binomial, más que una metodología alternativa.

<sup>71</sup> Permite conocer la viabilidad desde un lanzamiento nuevo de producto hasta la reducción de activos, usando el mismo principio de la metodología.

### 2.3 OPCIONES REALES

Previamente se nombraron a las Opciones Reales como una metodología que permite analizar alternativas de inversión, teniendo en cuenta la flexibilidad, incertidumbre y la volatilidad. Su enfoque parte del reconocimiento del papel importante que juega la gestión dinámica y continua de los proyectos, en la determinación del valor de éstos, y por tanto, en el análisis de su aceptación o rechazo.

De manera similar a las Opciones Financieras, las Opciones Reales implican las decisiones o derechos, sin obligación para adquirir o cambiar una alternativa de inversión<sup>72</sup>. Existe por tanto una relación directa entre las Opciones Financieras y las Opciones Reales, motivo por el cual los componentes de las segundas pueden ser entendidos a través de los elementos que ya se han explicado previamente como análogos de la siguiente manera:

**Figura 2. 5 Analogía entre las Opciones Financieras y las Opciones Reales**

OPCIONES FINANCIERAS		OPCIONES REALES
Precio de la Opción	S	Valor Presente Neto en función del Valor Esperado de los Flujos y la tasa WACC
Precio de Ejercicio	X	Costo de la Inversión
Porcentaje de Dividendos	K	Mantenimiento de la Opción
Tiempo hasta el vencimiento de la Opción	T	Tiempo de vigencia del Proyecto
Volatilidad de la Acción	$\sigma$	Volatilidad del Activo (S)
Interés sin Riesgo	r	Tasa libre de Riesgo

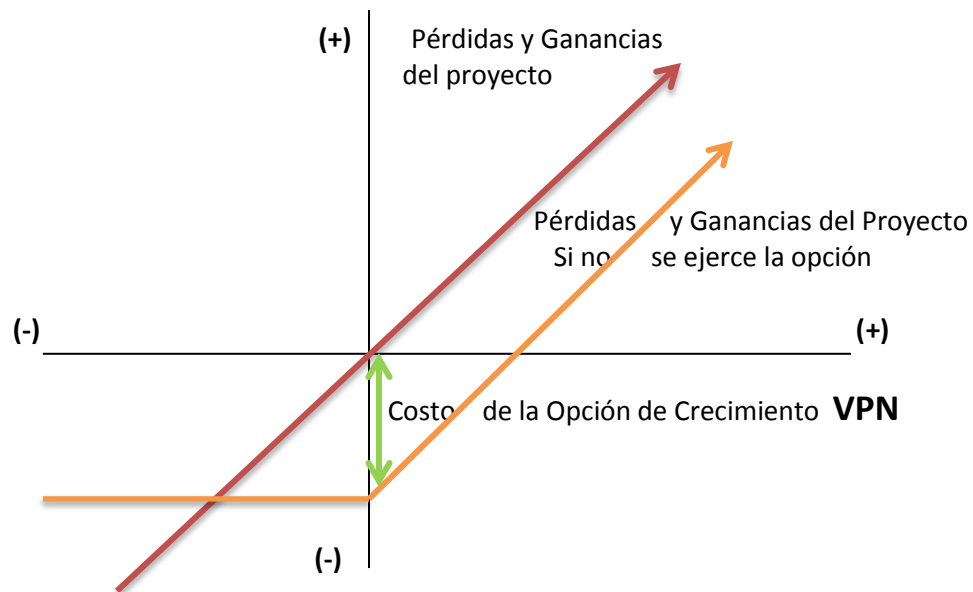
A mayor detalle se pueden explicar estos factores y su impacto de la siguiente manera:

- Valor Presente Neto: En función de la tasa WACC y el Valor Esperado de los Flujos que representan el valor de los activos Operativos que se van a adquirir.
- Costo de la Inversión: Es el desembolso requerido para adquirir el activo.
- Mantenimiento de la Opción: Expresado en porcentaje; es el pago periódico dado por los flujos de fondo que se pueden ganar o perder en cada momento del tiempo del proyecto.
- Tiempo de vigencia del Proyecto: Definido como la longitud del tiempo que se puede demorar la decisión de inversión. La posibilidad de posponer una inversión proporciona a la empresa un tiempo adicional para examinar la tendencia de los acontecimientos futuros reduciendo, al mismo tiempo, la posibilidad de incurrir en desembolso de efectivo por errores debido a que los acontecimientos se han desarrollado en contra de lo previsto.

<sup>72</sup> Trigeorgis, 1996.

Cuanto mayor sea el intervalo de tiempo (T), que se tiene de margen para demorar la decisión final, mayor será la posibilidad de que los acontecimientos se desarrollen de forma favorable aumentando la rentabilidad del proyecto. Es evidente, que si dichos acontecimientos fuesen contrarios a los intereses del decisor, éste renunciaría a realizar el proyecto evitando así una pérdida innecesaria.

**Figura 2.6 Asimetría entre las ganancias superiores y las pérdidas inferiores derivadas de la tenencia de una Opción<sup>73</sup>**



Volatilidad del Activo: Representa el riesgo asociado al proyecto, es preciso señalar que cuanto más grande sea más valiosa será la opción sobre la inversión. Ello se debe a la asimetría existente entre pérdidas y ganancias; así, un aumento de las operaciones hará aumentar la positividad del VPN mientras que un gran descenso de aquéllas no necesariamente hará que el VPN sea negativo<sup>74</sup>. Habrá casos en que el aumento de valor de la opción supere al descenso del VPN básico pero existirán otros en que ocurra exactamente lo contrario.

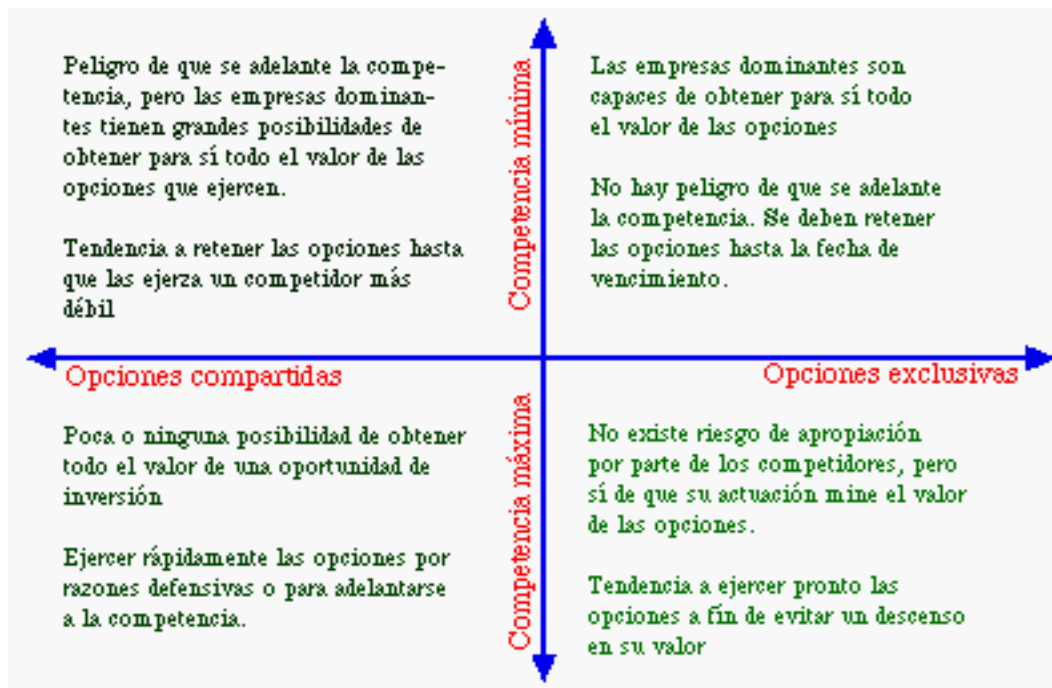
Concretamente, un aumento del valor de la opción de invertir no significa que aumente el deseo de hacerlo, puesto que el aumento del riesgo reduce el deseo de invertir (o retrasa la decisión de inversión) debido a que el incremento en el valor de la oportunidad de inversión se debe, precisamente, al valor de la espera. Por tanto, el aumento del valor de la opción de inversión refleja exactamente la necesidad de esperar todo lo que se pueda antes de proceder a realizar el proyecto de inversión.

<sup>73</sup> Juan Mascareñas, Las decisiones de inversión como opciones reales: Un enfoque conceptual, Biblioteca en la línea de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.

<sup>74</sup> Porque, en este caso, se pueden eliminar las pérdidas al no ejercer la opción de inversión.

- Tasa libre de riesgo: Es el valor temporal del dinero, por lo que un aumento del tipo de interés sin riesgo produce un descenso del valor del activo<sup>75</sup> y, al mismo tiempo, reduce el valor actual del precio de ejercicio. Por lo general, pero no siempre, el efecto neto resultante induce a pensar que un aumento del tipo de interés sin riesgo provoca un ascenso del valor de los proyectos con opciones de expansión (esto es, que un aumento del tipo de interés sin riesgo suele reducir con más fuerza el valor actual del precio de ejercicio que el valor del activo).

Figura 2. 7 Las Opciones de Crecimiento y el Factor Tiempo<sup>76</sup>



Además las empresas tienden a comprometer fondos en las inversiones más pronto que tarde, a pesar de la posibilidad de diferir en el tiempo dicho compromiso. La razón radica en que una opción es más valiosa cuando se posee en exclusiva que cuando es compartida porque los competidores que pueden replicar las inversiones de la empresa consiguiendo con ello la reducción de la rentabilidad del proyecto. Así que éste último se realizará antes de la fecha de vencimiento de la opción siempre que el costo de su diferimiento supere al valor sacrificado al ejercer la opción de inversión anticipadamente. Esto suele ocurrir cuando:

- Las opciones son compartidas
- El VPN del proyecto es alto
- Los niveles de riesgo y de tipo de interés son bajos
- Hay una gran competitividad en el sector

<sup>75</sup> Es visto como una forma de penalizar el valor actual de los flujos de efectivo esperados.

<sup>76</sup> KESTER, W. Carl: "Today's options for tomorrow's growth" Harvard Business Review.

### 2.3.1 Tipología de las Opciones

Por último para comprender mejor lo anterior, se debe mencionar que en las Opciones Reales se usa el mismo término de activo subyacente aplicado en las Opciones Financieras pero referido a otro activo. Este activo sobre el que se tendrá un derecho es el proyecto de inversión. Y este derecho se refleja en la toma de una decisión o en una acción, sobre dicho proyecto. Esta acción es referida a cualquier tipo de Opción y se explicarán a continuación.

**Figura 2.8 Tipología de las Opciones**

Categoría	Descripción	Importante en:
Opción de <b>Diferir</b>	La gerencia mantiene un alquiler o una opción de compra sobre un terreno, o recurso, valioso. Puede esperar (x años) para ver si los precios de los outputs justifican la construcción de un edificio, instalaciones, o el desarrollo del terreno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Todas las industrias extractivas de recursos naturales</li> <li>- Inmobiliarias</li> <li>- Granjas; papeleras; etc.</li> </ul>
<i>Inversión por etapas</i> (Tiempo para crear la opción)	La inversión en etapas, a través de una serie de desembolsos, crea la opción de abandonar el proyecto a mitad de camino si la nueva información fuera desfavorable. Cada etapa puede ser contemplada como una opción sobre el valor de las etapas posteriores y valorada como una opción compuesta.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proyectos de I+D, especialmente farmacéuticos</li> <li>- Proyectos con grandes desembolsos durante mucho tiempo: construcción a gran escala, capital-riesgo al arrancar un negocio, etc.</li> </ul>
Opciones de <b>Reducir, Cerrar y Reiniciar</b> (alterar la escala de las operaciones)	Si las condiciones del mercado no son más favorables que las esperadas, la corporación podrá reducir la escala de las operaciones y en casos extremos se podrían detener totalmente y reiniciarlas cuando convenga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industrias de recursos naturales como las mineras</li> <li>- Planificación y construcción de productos en sectores cíclicos: La Moda</li> <li>- Bienes de consumo</li> <li>- Inmobiliarias, etc.</li> </ul>
Opción de <b>Abandono</b>	Si las condiciones del mercado descienden fuertemente, la gerencia puede abandonar las operaciones actuales permanentemente y proceder a liquidar los activos de la empresa en el mercado de segunda mano.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industrias de capital intensivo: aerolíneas y ferrocarriles</li> <li>- Servicios financieros</li> <li>- Introducción de nuevos productos en mercados inciertos.</li> </ul>



<p>Opción de <b>cambio</b> (<i>outputs</i> o <i>inputs</i>)<sup>77</sup></p>	<p>Si los precios o la demanda varían, la gerencia puede cambiar la combinación de los outputs ofertados (flexibilidad de la producción). Alternativamente, los mismos outputs pueden fabricarse utilizando diferentes tipos de inputs (flexibilidad del <i>proceso</i>).</p>	<p><u>Cambios en los outputs:</u> Bienes con una demanda muy volátil:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrónica de consumo, juguetes, componentes de maquinaria, autos, etc.</li> </ul> <p><u>Cambios en los inputs:</u> Productos que dependen fuertemente del suministro de materias primas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Petróleo, energía eléctrica, química, agrícolas, etc.</li> </ul>
<p>Opciones de <b>Expansión o Crecimiento</b></p>	<p>Si las condiciones del mercado son más favorables que las esperadas, la corporación podrá expandirse en número de plantas o bien aumentar la escala de producción con procesos o productos de nueva generación y acelerar la utilización de los recursos, generando el fortalecimiento de las capacidades internas.</p> <p>Una inversión temprana (adquisición estratégica, arrendamiento sobre terreno no desarrollado o reservas petrolíferas, redes/infraestructura de información) es un prerrequisito o enlace en una cadena de proyectos interrelacionados, que posibilitan futuras oportunidades de crecimiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industrias basadas en infraestructura o adquisiciones estratégicas, especialmente de alta tecnología o industrias con múltiples generaciones o aplicaciones de productos.</li> <li>- Operaciones multinacionales.</li> <li>- Acceso a nuevos mercados.</li> </ul>
<p>Opciones con múltiples <b>interacciones</b></p>	<p>En la vida real los proyectos implican a menudo un <i>compendio</i> de varias opciones, que favoreciendo el crecimiento en caso de ascenso (call) y protegiendo en caso de descenso (put), se presentan conjuntamente. Su valor combinado puede diferir de la suma de las opciones individuales (porque interactúan entre sí). Pueden también interactuar con opciones de flexibilidad financiera.</p>	<p>Los proyectos de la mayoría de las industrias comentados anteriormente.</p>

<sup>77</sup> Output-Input (salida/entrada), término que se utiliza para predecir la evolución del consumo intermedio en una rama de actividad, así como la de su valor añadido.

### 2.3.1.1 Diferir la Inversión

Entre los elementos que deben estar presentes para que existan las Opciones Reales, se mencionó a la flexibilidad. Esta flexibilidad está dada por la posibilidad de diferir, es decir, poder posponer por un tiempo la decisión de realizar una inversión. Este hecho representa una ventaja porque durante este periodo la corporación puede obtener información acerca de diversos factores que afectan directa o indirectamente el valor del proyecto y que forman parte de la incertidumbre implícita de toda inversión, como lo es el movimiento de activo en el mercado, el cambio en la tasa de descuento o la aparición de nuevas tecnologías, por mencionar algunas, que conllevará a la toma de una mejor decisión para el cumplimiento de los planes estratégicos de la institución. Es por eso que se puede concluir que el valor de las Opciones Reales es el valor de la flexibilidad de la inversión que permite disminuir la incertidumbre asociada.

La opción de diferir una inversión puede entenderse como lo análogo a una opción de compra americana. La empresa tiene la opción de invertir en un proyecto, cuyo valor está dado por el valor actual de los flujos de fondos futuros, el cual puede comprar si realiza la inversión. Si la corporación no realiza la inversión, sigue teniendo en su poder la opción de invertir. Sin embargo, la posibilidad de diferir no estará abierta por siempre, sino que estará sujeta a las condiciones del mercado y a la competencia. Este límite es el que fijará la fecha de expiración de la opción.

**Ejemplo:** Una institución está analizando realizar una inversión en tecnología informática cuyo costo es de \$60,000. Se espera que la inversión genere un flujo de fondos de \$11,000 anuales, a lo largo de ocho años. Se estima que la tasa de descuento WACC es del 9%. La empresa desea saber si debe de invertir o no en este proyecto, para lo cual usa la metodología del VPN por ser la mejor alternativa dentro de las formas de valuación de inversiones actuales.

$$VPN = \sum_1^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1+WACC)^n} - Inversión_{inicial}$$

$$VPN = VP - Inversión_{inicial}$$

Donde:

$$VP = \sum_1^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1+WACC)^n}$$

$$VP = \sum_{n=1}^8 \frac{11,000}{(1+0.09)^n} = \$60,883.01$$

Es decir<sup>78</sup>:

$$VPN = 60,883.01 - 60,000 = \$883.01$$

<sup>78</sup> Como ya se ha definido en el capítulo uno de esta tesis. El VPN puede expresarse también en función del Valor Presente (VP) debido a que éste representa por sí solo el valor actual de los flujos de fondos futuros.

La cantidad resultante de \$883.01 es positiva, y basados en el criterio del VPN la corporación debería realizar la inversión. En este caso, se considera que la inversión es ahora o nunca, es decir, la oportunidad de invertir se pierde después del primer año.

Afortunadamente, la mayoría de las inversiones no son de este tipo y es posible posponer la decisión de inversión. Por ejemplo, supóngase que la misma corporación tiene la posibilidad de diferir la inversión por un año con dos escenarios, uno es favorable, en el cual los flujos de fondos anuales aumentan en un 20%, y el otro es desfavorable en donde disminuyen un 15%. Bajo estas circunstancias, el VPN es:

1) Para un incremento del 20%:

- Se tiene  $u=1.20$ , por lo tanto  $\$11,000(1.20)=\$13,200$ ; y el VPN:

$$3 \quad VPN_u = VP_u - Inversión_{inicial}$$

Donde:

$$VP_u = \sum_{n=1}^8 \frac{13,200}{(1+0.09)^n} = \$73,059.61$$

$$VPN_u = 73,059.61 - 60,000 = \$13,059.61$$

2) Para una disminución del 15%:

- Se tiene  $d=0.85$ , por lo tanto  $\$11,000(0.85)=\$9,350$ ; y el VPN:

$$4 \quad VPN_d = VP_d - Inversión_{inicial}$$

Donde:

$$VP_d = \sum_{n=1}^8 \frac{9,350}{(1+0.09)^n} = \$51,750.56$$

$$VPN_d = 51,750.56 - 60,000 = -\$8,249.44$$

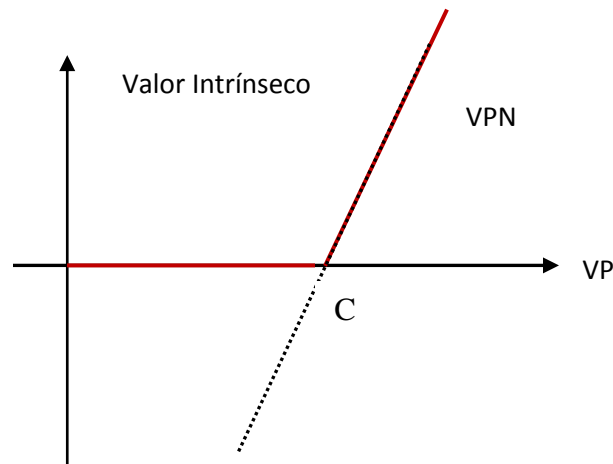
De lo anterior se puede expresar a los flujos de fondos para cada escenario como:

- $V_1^u = \max(VPN_1^u; 0) = \max(VP_1^u - Inversión_{inicial}; 0) = \max(73,059.61 - 60,000; 0) = \$13,059.61$
- $V_1^d = \max(VPN_1^d; 0) = \max(VP_1^d - Inversión_{inicial}; 0) = \max(51,750.56 - 60,000; 0) = \$0$

Lo que se observa es que en el escenario favorable la inversión reporta una ganancia, caso contrario para el otro escenario, en donde se genera una pérdida; de manera tal que si la empresa decide esperar para realizar la inversión, debe decidir no realizarla en el escenario desfavorable, esto representa que el valor de los flujos de fondo para este caso sea cero. Sin embargo el objetivo de toda corporación es maximizar las utilidades y por lo tanto, se requiere encontrar un valor para esta opción de diferir.

Retomando lo explicado en la sección de Opciones Financieras, puede decirse que los flujos de efectivo después del primer año son similares al valor intrínseco de las Opciones Financieras. Aquí el activo subyacente es el valor actual de los flujos de fondos futuros para cada escenario y el precio de ejercicio es el costo de la inversión (C). De manera gráfica:

**Figura 2.9 Valor Intrínseco de las Opciones de Compra y el VPN**



Como se aprecia en la gráfica, la línea punteada representa el VPN de la inversión, mientras que la línea gruesa es el valor intrínseco que se genera ante la decisión de la empresa de invertir o no. Este valor intrínseco es igual al VPN cuando el VP es mayor al costo de la inversión; es decir cuando se tiene un VPN positivo y es igual a cero en caso contrario, donde se tiene un VPN negativo y el VP es menor al costo de la inversión.

En la gráfica además se ve de manera clara como una opción de diferir es análoga a una opción de compra americana. Dada esta analogía, esta opción se puede evaluar por medio del método de portafolio de réplica o por la valuación neutral al riesgo<sup>79</sup>. Para conformar el portafolio de réplica se debe usar un activo que se comercialice en el mercado y que esté perfectamente correlacionado con el proyecto de inversión; es decir, que contenga el mismo flujo de fondos para cada escenario. Sin embargo este tipo de activo raramente existe en el mercado. Por esto es que se toma el valor del proyecto de inversión<sup>80</sup>. Para realizar la valuación neutral, se deben calcular las probabilidades  $q$  mediante las cuales el valor de los flujos al momento uno, descontados a la tasa libre de riesgo, coincide con el valor actual de los flujos:

$$VP_0 = \frac{VP_1^u q + VP_1^d (1 - q)}{1 + r}$$

<sup>79</sup> Recordando que ambos resultados son idénticos, como ya se demostró en este capítulo.

<sup>80</sup> Para más detalle sobre la Valuación de Opciones mediante portafolio de réplica, consultar Copeland y Antikarov, 2001.

Expresado de manera multiplicativa el incremento y la disminución del VP, puede expresarse:

$$VP_0 = \frac{VP_0 u q + VP_0 d (1 - q)}{1 + r}$$

Finalmente, despejando a obtenemos:

$$q = \frac{(1 + r) - d}{u - d}$$

Y el valor de la opción, será su valor esperado al momento uno, descontado a la tasa libre de riesgo:

$$\text{ValorOpción} = \frac{V_1^u q + V_1^d (1 - q)}{1 + r}$$

En donde, para los valores de  $u=1.20$  y  $d=0.85$  planteados en el ejemplo, y suponiendo ahora que se tiene una tasa libre de riesgo del 5%, el valor de la Opción de diferir es:

$$q = \frac{(1 + 0.05) - 0.85}{1.20 - 0.85} = 0.5714$$

$$\text{ValorOpción} = \frac{13,059.61(0.5714) + 0(1 - 0.5714)}{1 + 0.05} = \$7,107.27$$

Este valor de la opción, indica que si compramos con el VPN, se puede obtener el valor de la flexibilidad como el valor que se le agrega al VPN:

$$\$7,107.27 - \$883.01 = \$6,224.26$$

### 2.3.1.2 Abandonar el Proyecto

Se pueden diferenciar dos tipos de inversiones. Por un lado, una institución puede hacer una inversión que la obligue a mantenerse sujeta a ella durante toda la vida del proyecto, sin importar si el mismo genera pérdida o ganancias. Por otro lado, existen inversiones que permiten a la institución abandonar el proyecto cuando éste deja de ser rentable, generando mayores ingresos por la venta del proyecto que manteniendo la inversión. Esta flexibilidad de la inversión, reflejada en la decisión de continuar o abandonar el proyecto, es un valor agregado para la inversión. Este valor se puede obtener por medio de la metodología de Opciones Reales.

La opción de abandonar un proyecto de inversión, es equivalente a una opción de venta americana, por lo tanto se evaluará de la misma manera. Siguiendo con la analogía entre las Opciones Financieras y las Opciones Reales planteada previamente en este apartado, el activo subyacente estará dado por el valor actual de los flujos de fondo futuros del proyecto, es decir, el valor de la inversión. A su vez, el precio de ejercicio, que será el precio al cuál se venderá el proyecto, es el monto que obtendrá la institución por la venta de las instalaciones y la reasignación de los recursos destinados a dicho proyecto al que se invirtió. Por último al igual que la opción de diferir, existe un periodo durante el cual se puede decidir y llevar a cabo la opción de abandonar el proyecto, y ese límite será la fecha de expiración de la opción.

**Ejemplo<sup>81</sup>:** Una corporación realizó una inversión cuyos flujos de fondo futuros tienen el valor presente de \$100,000. Al siguiente año, se presentan dos escenarios. Uno es favorable, en el que el valor actual de los flujos de fondo aumentan a \$125,000, en un 25%. Y otro desfavorable, en donde el valor actual de los flujos de fondo ha disminuido a \$80,000, en un 20%. La empresa tiene la opción de abandonar el proyecto y vender las instalaciones por \$110,000.

Para que la empresa pueda evaluar esta opción de abandonar, debe considerar el valor intrínseco de los dos escenarios, al final del año:

- Si se presenta el escenario favorable, el valor intrínseco sería:

$$V_1^u = \max(\text{ValorVenta} - VP_1^u; 0) = \max(110,000 - 125,000; 0) = \$0$$

- En el escenario desfavorable, el valor intrínseco sería:

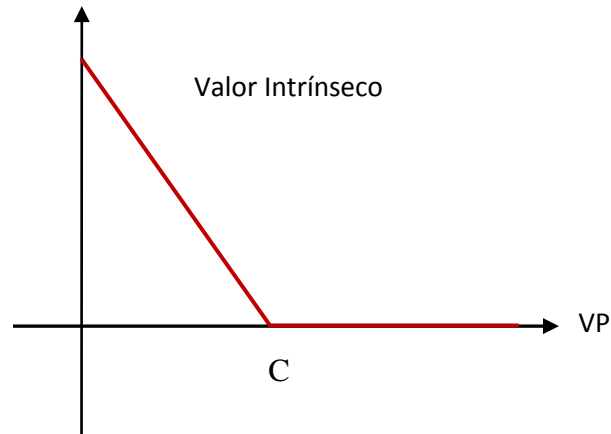
$$V_1^d = \max(\text{ValorVenta} - VP_1^d; 0) = \max(110,000 - 80,000; 0) = \$30,000$$

---

<sup>81</sup> Tomado del libro, Roberto D. Bacchinni, Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, 2006.

De forma genérica, se puede graficar el comportamiento del valor intrínseco de esta opción, para valores actuales de flujo de fondo:

**Figura 2.10 Valor Intrínseco de las Opciones de Venta y el VPN**



La información que proporciona la gráfica es que se decidirá abandonar el proyecto (y el valor intrínseco será positivo) cuando el valor presente de los flujos (VP) sea menor que el valor de venta del proyecto (C). En dichos casos, el valor intrínseco será la diferencia entre ambos valores:

$$\text{Valor Intrínseco} = C - VP$$

En caso contrario, si el valor presente de los flujos de fondos futuros es mayor que el valor de venta del proyecto, la empresa decidirá continuar con el proyecto y el valor intrínseco será cero.

Finalmente, continuando con el ejemplo, utilizando el método de valuación neutral, con una tasa de interés libre de riesgo del 6%, se puede calcular:

$$q = \frac{(1+r) - d}{u - d} = \frac{(1+0.06) - 0.8}{(1.25 - 0.8)}$$

$$q = 0.5778$$

Y el valor de la opción, será su valor esperado al momento uno, descontado a la tasa libre de riesgo:

$$\text{ValorOpción} = \frac{V_1^u q + V_1^d (1-q)}{1+r} = \frac{0(0.5778) + 30,000(1-0.5778)}{(1+0.06)}$$

$$\text{ValorOpción} = \$11,949.69$$

Teniendo el valor de la opción, la corporación debe compararlo con la posibilidad de abandonar el proyecto hoy, ya que la opción puede ejercerse en cualquier momento. Si se decide abandonar hoy la inversión, el resultado será el valor intrínseco que resultaría de ejercer inmediatamente:

$$\text{Valor Intrínseco} = C - VP$$

$$\text{Valor Intrínseco} = \$ 110,000 - \$100,000$$

$$\text{Valor Intrínseco} = \$10,000$$

Como, el valor de la opción es mayor que el valor de ejercerla hoy:

$$\text{Valor de la Opción} > \text{Valor Intrínseco}$$

$$\$11,949.69 > \$10,000$$

La empresa debe elegir continuar la inversión por un periodo y abandonar si las condiciones son desfavorables. El valor de la opción de abandonar le agrega valor a la inversión, por lo tanto la inversión posee un valor total de<sup>82</sup>:

$$\text{Valor total de la Inversión} = VP + \text{Valor de la Opción}$$

$$\text{Valor total de la Inversión} = \$100,000 + \$11,949.69$$

$$\text{Valor total de la Inversión} = \$111,949.69$$

<sup>82</sup> Recordándole al lector, que para este ejemplo el Valor Presente (VP) es proporcionado como dato, pero

que debe ser obtenido como: 
$$VP = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Flujos}_{\text{efectivo}}}{(1+WACC)^t}$$



### 2.3.1.3 Expandir y/o Reducir la Inversión

Una forma más clara de ver la flexibilidad, está dada por la posibilidad que tiene una institución de expandir o reducir la inversión, de acuerdo a las situaciones del mercado y a la economía que enfrenta la misma institución. En algunos casos, el valor de una inversión puede estar dado no solo por sus flujos de fondo, sino por el valor estratégico de la misma. Y este valor estratégico es la posibilidad de generar futura inversiones a partir de éste, o lo que es lo mismo, reinvertir en el proyecto, aumentando los flujos de fondos futuros. Esto se da generalmente en casos, donde el desempeño de una corporación es mejor que el esperado, y por lo tanto, es recomendable una expansión de su inversión. Por otro lado, cuando se tiene un rendimiento por debajo del esperado, existe la posibilidad de flexibilizar la inversión a través de su reducción, sin tener que abandonar totalmente el proyecto. En este caso la opción consiste en vender algunos activos, reduciendo la magnitud del proyecto y con ello disminuyendo las posibilidades de pérdidas que se puedan estar generando. Ambas opciones, tanto la de expandir como la de reducir la inversión, permiten a la gerencia de la institución tomar distintas decisiones para adaptarse en cada momento a las distintas circunstancias que puedan presentarse, y así aumentar las ganancias o reducir las pérdidas. Es decir, se busca optimizar la inversión a partir de la posibilidad de decisiones estratégicas durante todo el desarrollo del proyecto. Estas posibilidades de expansión y reducción tienen un valor, que incrementan el valor total de la inversión.

#### - Opción de Expansión

La opción de expandir una inversión es similar a una opción de compra americana, donde el valor del activo subyacente está dado por el Valor Presente Neto de la Inversión, previo a la ampliación, mientras que el precio de ejercicio es el costo de esa expansión. Es decir que la corporación tiene el derecho de adquirir un activo<sup>83</sup>, por un periodo determinado, a una fecha de vencimiento, y por el cual va a pagar un precio predeterminado. Debido a esto a diferencia de las Opciones Financieras, en el caso de una Opción de expansión, el valor intrínseco es ligeramente modificado, de la siguiente manera:

$$\text{Valor Intrínseco} = \max (FFExpansión_T - \text{CostoExpansión}; 0)$$

Donde  $FFExpansión_T$  es el valor presente de los Flujos futuros que se obtendrían por la expansión, calculado en el momento en que expira la opción (T), y el costo de expansión es la inversión que debe realizarse para ampliar el proyecto. A su vez, la expansión se incrementa en un porcentaje (K) determinado del Valor Presente Neto del proyecto:

$$FFExpansión_T = K (VPN_T)$$

Por lo que el valor intrínseco queda expresado como:

$$\text{Valor Intrínseco} = \max [K (VPN_T) - \text{CostoExpansión}; 0]$$

---

<sup>83</sup> El activo es el flujo de fondos que surge de la expansión de la inversión.

Con el valor intrínseco al vencimiento, al igual que en la valuación de Opciones Financieras, se calcula el valor de las opciones mediante árboles binomiales. Con esta metodología, se calculan los valores de la opción en los nodos anteriores, y considerando que la expansión puede concretarse en cualquier periodo (la opción es americana), el valor de la Opción de expansión en cada escenario será el mayor entre el resultado por ejercicio y el valor de la opción:

*Resultado de Ejercicio en  $t = K (VPN_T) - \text{Costo de Expansión}$*

$$\text{Valor de la Opción} = \frac{V_u q + V_d (1 - q)}{(1 + r)^{\Delta t}}; \text{ Donde}$$

$r$ : Tasa de interés efectiva anual libre de riesgo

$\Delta t$ : Longitud de cada periodo

$V_u$  y  $V_d$ : Valores de la Opción en los nodos adyacentes; en el caso en el que el VPN aumente o disminuye, respectivamente

$q$ : Probabilidad neutral al riesgo de que el VPN aumente

$$q = \frac{(1 + r)^{\Delta t} - d}{u - d}$$

El primer valor corresponde a ejercer la opción, es decir, concretar la ampliación de la inversión, mientras que el segundo es el valor de mantener la opción, es decir no realizar la expansión. El criterio a seguir, es que la corporación debe ampliar la inversión en el momento en que el valor de la expansión del proyecto sea mayor al de posponer su expansión.

**Ejemplo:** Una institución está por poner en marcha un proyecto que tiene un Valor Presente Neto de \$200,000. Sin embargo ante la incertidumbre que existe en el contexto del mercado de la inversión que se está por realizar, el valor anterior es simplemente un valor esperado, y se estima que el VPN se podrá conocer con mayor certeza al finalizar el año. Si la evolución del mercado es favorable para el proyecto, el VPN se incrementará en un 25%, mientras que en caso de que el mercado no responda favorablemente al proyecto, el VPN se reducirá en un 20%.

En base a esta información, se tienen dos posibles valores del VPN en el momento 1:

- Si se presenta el escenario favorable, el Valor Presente Neto, sería:

$$VPN_u = 200,000 (1 + 0.025) = \$250,000$$

- En el escenario desfavorable, el Valor Presente Neto sería:

$$VPN_d = 200,000 (1 - 0.020) = \$160,000$$

Hasta aquí lógicamente, el proyecto debería realizarse, ya que en ambas situaciones el VPN es positivo. Sin embargo existe otra decisión a tomar, relacionada con la dimensión del proyecto. Por las características que presenta la inversión, existe la posibilidad de realizar una ampliación en la escala de un 15% (es decir, que si se decide expandir, se obtendrá un incremento del VPN por dicho porcentaje). El costo de llevar a cabo la expansión es de \$25,000.

De este modo, al poseer el proyecto una Opción de Expansión:

- Si se presenta el escenario favorable, el valor intrínseco sería:

$$\text{Valor Intrínseco}_u = \max [K (\text{VPN}_u) - \text{CostoExpansión}; 0 ] = \max [0.15(250,000) - 25,000; 0 ]$$

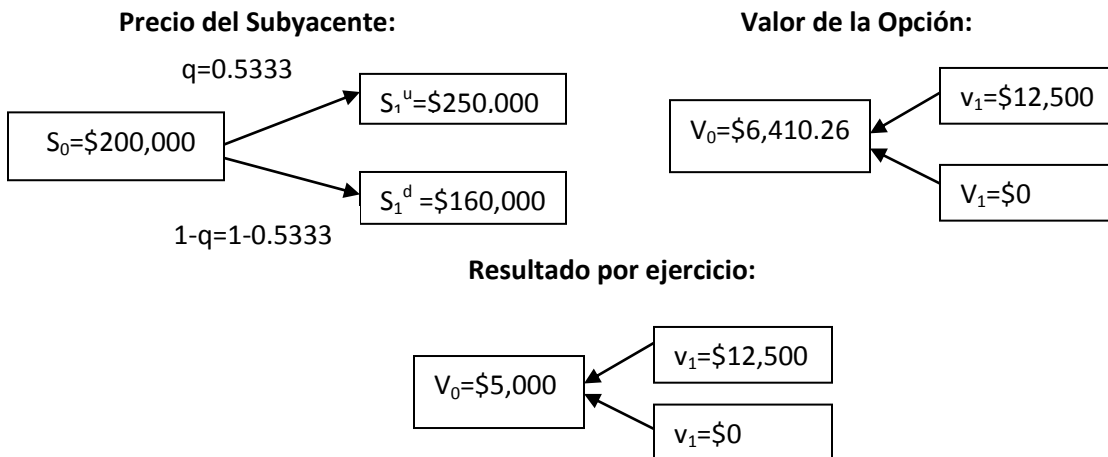
$$\text{Valor Intrínseco}_u = \max [12,500; 0 ] = \$12,500$$

- En el escenario desfavorable, el valor intrínseco sería:

$$\text{Valor Intrínseco}_d = \max [K (\text{VPN}_d) - \text{CostoExpansión}; 0 ] = \max [0.15(160,000) - 25,000; 0 ]$$

$$\text{Valor Intrínseco}_d = \max [-1,000; 0 ] = \$0$$

En base a esto, suponiendo una tasa libre de riesgo del 4% efectivo anual y usando la metodología del Modelo Binomial<sup>84</sup>, se tiene, la siguiente representación del Árbol Binomial:



Comparando el valor de la Opción de Expandir (esperar y decidir sobre la expansión al finalizar el año) que asciende a \$6,410.26, se observa que es mayor que el resultado por ejercicio inmediato (expandir directamente al inicio) que tiene un valor de \$5,000. Por lo tanto, resulta conveniente mantener la opción y expandir, en caso de que el mercado evolucione favorablemente.

<sup>84</sup> Para mayor detalle para la obtención de estos resultados, puede consultarse el punto 2.2.3.2 Modelo Binomial Generalizado, ejemplo Valuación de Opciones Americanas de esta tesis. Así mismo en este ejemplo se supuso que la expansión solamente puede realizarse dentro del primer año, pero en otros casos, donde se permita un lapso mayor para la opción, se debe generalizar la misma metodología del modelo binomial para n periodos.

#### - Opción de Reducción

Ya se ha explicado la posibilidad de expandir la inversión, si la evolución del contexto era favorable al proyecto. Sin embargo cuando los factores que afectan directamente al proyecto, han influido para generar un escenario desfavorable, que proyecta pérdidas; la sugerencia es la Opción de Reducir la inversión a escala, que a diferencia de la opción de abandonar, brinda la posibilidad de continuar con el proyecto y con ello genera la flexibilidad de la institución de poder tener un mejor desempeño futuro.

Esta opción es semejante a una opción de venta americana, donde el valor del activo subyacente está dado por el Valor Presente Neto de la inversión previo a la contratación del proyecto, mientras que el precio de ejercicio es el valor que se obtiene por la venta o reasignación de las instalaciones y/o activos que dejan de prescindir en el proyecto después de la reducción.

A diferencia de las Opciones Financieras y al igual que la Opción de Expansión, una Opción de Reducción, presenta un valor intrínseco ligeramente modificado, debido a que la institución recibe el precio de ejercicio (*ValorVenta*) al liquidar una parte del proyecto y lo que reasigna es una parte del valor presente de los flujos de fondos futuros (*FFPerdidos<sub>T</sub>*) calculado al momento (T) que expira la opción, por lo tanto:

$$\text{Valor Intrínseco} = \max (\text{ValorVenta} - \text{FFPerdidos}_T; 0)$$

Análogamente a la sección previa, el Valor Presente Neto disminuirá en un porcentaje (h) como consecuencia de la reducción del proyecto:

$$\text{FFPerdidos}_T = h (\text{VPN}_T)$$

Por lo tanto, el valor intrínseco, queda expresado como:

$$\text{Valor Intrínseco} = \max [\text{ValorVenta} - h (\text{VPN}_T); 0]$$

Para evaluar la opción, la metodología es semejante a una opción de expansión, considerando que se puede ejercer la opción en cualquier momento, hasta la fecha de vencimiento inclusive.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la opción es americana, el valor en cada escenario será el mayor entre la comparación del resultado por ejercicio y el valor de la Opción:

*Resultado de Ejercicio en t = Valor Venta-h (VPN<sub>t</sub>)*

$$\text{Valor de la Opción} = \frac{V_u q + V_d (1-q)}{(1+r)^{\Delta t}}; \text{ Donde}$$

r: Tasa de interés efectiva anual libre de riesgo

$\Delta t$ : Longitud de cada periodo

$V_u$  y  $V_d$ : Valores de la Opción en los nodos adyacentes; en el caso en el que el VPN aumente o disminuye, respectivamente

q: Probabilidad neutral al riesgo de que el VPN aumente

$$q = \frac{(1+r) - d}{u - d}$$

El primer valor es el que se obtiene por ejercer la opción, es decir, reducir la inversión, mientras que el segundo monto representa el valor de mantener la opción, es decir, no realizar la reducción manteniendo el proyecto con la misma escala. Por lo tanto el criterio consiste en que la institución deberá reducir la inversión cuando el valor que genere dicha decisión supere al valor de posponerla.

Hasta este momento ya se han explicado las cuatro tipologías de opciones que se presentan con mayor frecuencia en las corporaciones<sup>85</sup> y con ello se da por terminado este capítulo, que ha tratado a detalle a las Opciones Financieras, con el propósito de que se comprendan a través de su analogía, las bases que definen a la teoría de las Opciones Reales y que son el fundamento que la llevan a ser una metodología de valuación de proyectos que presenta mayores beneficios que las metodologías de valuación tradicionales al sobreponer las limitantes de incertidumbre y flexibilidad.

Con la comprensión de la Teoría de Opciones Reales, en el siguiente capítulo se mostrará la aplicación del Modelo Binomial en la valuación de la propuesta de expansión que se tiene contemplada para la Central Nuclear Laguna verde, para posteriormente analizar su viabilidad y cumplir así con el objetivo general de esta tesis.

<sup>85</sup> Para referencia de las tipologías restantes mencionadas en esta tesis, se invita al lector a consultar las siguientes fuentes:

- Opción de Inversión por etapas: Majd & Pindyck (1987): "Time to Build, Option Value, and Investment Decisions", *Journal of Financial Economics* 18 (Mar.). Pp.: 7-27.
- Opción de Cambio: Margrabe (1978): "The Value of an Option to Exchange One Asset for Another". *Journal of Finance* 33, 1 (Mar.). pp.: 349-360
- Opción de Múltiples Interacciones: Brennan & Schwartz (1985): "Evaluating Natural Resource Investments", *Journal of Business* 58,2 (Abril). Pp.: 135-157

*CAPÍTULO 3*

*APLICACIÓN DE OPCIONES REALES*

*EXPANSIÓN DE LA*

*CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA*

*LAGUNA VERDE (CNLV)*

### 3.1 LA ENERGÍA NUCLEAR

La aparición de la energía nuclear, tuvo su aparición con el proyecto Manhattan, el cuál consistió en un conjunto de sucesos<sup>86</sup> que tenían como objetivo el desarrolló la bomba atómica. El proyecto estuvo a cargo del General Leslie Richard Groves (encargado de las operaciones militares y de seguridad del proyecto) y de Julius Robert Oppenheimer (director científico del proyecto, encargado de la investigación para el desarrollo de la bomba nuclear). Dicho proyecto fue importante porque durante él se crearon laboratorios de investigación y de generación de materiales radiactivos (arrojando estudios que dieron origen al desarrollo de la teoría nuclear) y centros de ensayos, donde se realizó la primera prueba atómica, llamada Trinity, el 16 de julio de 1945 y en agosto del mismo año se lanzaron las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki. Sus principales instalaciones fueron el Laboratorio Nacional de los Álamos en Nuevo México y en Hanford se instalaron los reactores nucleares. La energía nuclear para fines pacíficos, surgió en el año de 1953 con el discurso “Átomos para la Paz” del Presidente Eisenhower. Esto representó el enfoque mundial sobre los usos pacíficos de la energía atómica, creando directrices importantes en dos sentidos, la creación del OIEA y la más importante, la explotación comercial de la energía nuclear. El primer proyecto fue el programa nuclear naval por parte del almirante Hyman Rickover, quien con sus ideas de hacer funcionar un motor de forma segura y construir una planta de energía nuclear de alta temperatura, se logró el desarrollo de un motor nuclear para propulsión, y con ello dio origen al Nautilus (1954), primer submarino nuclear para la fuerza naval.

Pocos años después comenzó el uso comercial de los reactores de agua ligera (LWR). Estos reactores usan como moderador de la velocidad de los neutrones, o fluido refrigerante, el agua ordinaria. Existen dos tipos característicos, los reactores de agua a presión (PWR) en los que el agua se encuentra a 150 atmósferas y 600 °F. Y los reactores de agua en ebullición (BWR) en los que el agua de enfriamiento se encuentra a presiones más bajas del orden de 70 atmósferas, pero a temperaturas más altas de hasta más de 1000 °C.

El primer reactor comercial BWR y que contó además con la primer licencia de operación para un reactor nuclear fue Vallecitos. Contaba con una energía eléctrica con 20MWt y 5 MWe, suministraba energía a la red de distribución de la Pacific Gas&Electric Comapany desde 1957 hasta 1963. Después de Vallecitos le siguió en Illinois el reactor BWR llamado Dresden (BWR), con 210 MW, que fue el primer reactor financiado en forma privada. A partir de entonces la seguridad intrínseca de este tipo de reactores ha hecho que actualmente sea de los más construidos a nivel mundial. En México se cuentan con dos reactores en Laguna Verde con tecnología BWR, productos de la evolución de este tipo de reactores.

---

<sup>86</sup> Sucesos con origen en 1939 con la carta al presidente Roosevelt, pasando por la pila de Fermi en 1942 y culminando con su sustitución en 1947 con la formación de la Comisión de Energía Atómica.



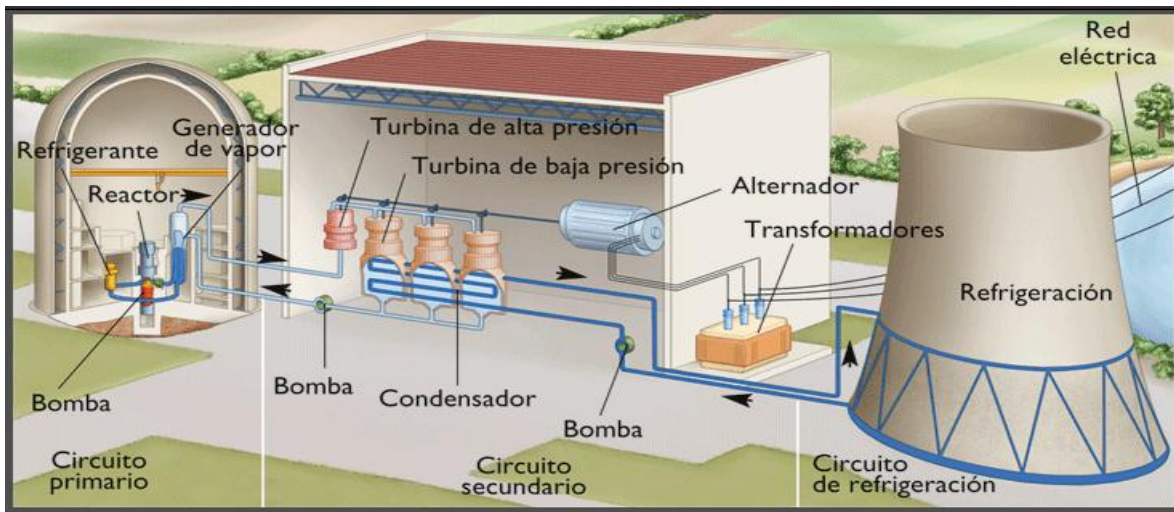
### 3.1.1 Centrales Nucleoeléctricas y Reactores

Una nucleoeléctrica es una central térmica de producción de electricidad, cuyo principio de funcionamiento es esencialmente el mismo que el de las plantas que funcionan con carbón, combustóleo o gas; la conversión de calor en energía eléctrica. Esta conversión se realiza en tres Etapas:

- Primera Etapa: La energía del combustible se utiliza para producir vapor a elevada presión Y temperatura.
- Segunda Etapa: La energía del vapor se transforma en movimiento de una o más turbina.
- Tercera Etapa: El giro del eje de la turbina se transmite a un generador o alternador, que produce energía eléctrica.

Las centrales nucleoeléctricas se diferencian de las demás centrales térmicas solamente en la primera etapa de conversión, es decir, en la forma de producir vapor<sup>87</sup>. En las centrales convencionales el vapor se produce en una caldera donde se quema de una forma continua carbón, combustóleo o gas natural. **Las nucleoeléctricas tienen un reactor nuclear en donde se genera energía a partir de la fisión<sup>88</sup>, considerado como su elemento más importante** y que equivale a la caldera de las centrales convencionales. Este reactor utiliza la energía nuclear del combustible, no tiene sistemas de inyección continua de combustible y aire, ni en él se necesita un dispositivo de eliminación continua de residuos sólidos y tampoco se producen gases de combustión.

Figura 3.1 Esquema de una Central Nucleoeléctrica<sup>89</sup>



<sup>87</sup> El principio de funcionamiento de una central nucleoeléctrica se explicará a mayor detalle en el ciclo termodinámico de la central Nucleoeléctrica Laguna Verde.

<sup>88</sup> La fisión nuclear consiste en la ruptura del núcleo de un átomo de alto peso atómico (por ejemplo el Uranio-235) en otros más ligeros por medio de bombardeo con partículas subatómicas, por ejemplo neutrones, liberando en este proceso energía calorífica, productos de fisión y más neutrones.




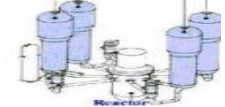
<sup>89</sup> Fuente: Central Nuclear de Trillo (kalipedia.com).



### 3.1.1.1 Componentes Típicos de un Reactor Nuclear

Los componentes típicos y su papel que desempeñan dentro de los reactores nucleares pueden describirse, mediante la siguiente tabla:

**Figura 3.2 Componentes y Características de un Reactor Nuclear**

Componente Típico de un Reactor	Utilidad y/o Características	Imagen del Componente
Vasija a presión del reactor	Sirve de contenedor de combustible en la mayoría de los reactores. Sin embargo, en algunos diseños, las barras de combustibles están contenidas dentro de tubos a presión individuales.	
Combustible	<p>Puede ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isótopo físil (divisible): Uranio-235 y Plutonio-239</li> <li>- Isótopo fértil (convertible en físil por activación neutrónica): Uranio-238 y Torio-232</li> <li>- Mezclas de los anteriores (MOX, Mezcla de Óxidos de Uranio y Plutonio)</li> </ul> <p>El combustible habitual en las centrales refrigeradas por agua ligera es el dióxido de uranio enriquecido, en el que entre 3% y 4% de los núcleos de uranio son de U-235 y el resto de U-238. La proporción de U-235 en el uranio natural es sólo de 0.72% de los átomos, por lo que es necesario someterlo a un proceso de enriquecimiento en este nucleído.</p>	
Moderador	<p>Cumplen con la función de frenar la velocidad de los neutrones producidos por la fisión, para que tengan la oportunidad de interactuar con otros átomos físisles y mantener la reacción en cadena. Como regla general, a menor velocidad del neutrón, mayor probabilidad de fisionar con los núcleos del combustible. Tipos de moderadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua (también llamada agua ligera o agua normal)</li> <li>• Agua pesada</li> <li>• Grafito</li> </ul>	
Barras de Control	<p>Sirven para controlar la potencia del reactor, normalmente son de carburo de boro, utilizado para absorber neutrones, de manera que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La inserción de las barras baja la potencia del reactor</li> <li>• La extracción de las barras aumenta la potencia del reactor</li> </ul>	
Refrigerante	<p>Sirve para extraer el calor producido en el núcleo para cuidar su integridad física, pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua (también llamada agua ligera o agua normal), Agua pesada, Anhídrido carbónico, Helio, Sodio metálico.</li> </ul>	
Instrumentación	Estos son necesarios para monitorear el comportamiento de las diversas variables presentes en el reactor.	
Generador de Vapor	Sirve para separar el vapor del refrigerante (agua o agua pesada) y lo dirige hacia las turbinas para generar electricidad. El generador de vapor es parte del sistema de refrigeración.	
Contención	Los reactores están contenidos dentro de una contención que actúa como blindaje contra las radiaciones y está diseñado para prevenir la liberación de radiactividad al medio ambiente. La carencia de una contención es un diseño débil de algunos reactores soviéticos.	

### 3.1.1.2 Tipos de Reactores Nucleares

Existe más de un criterio en que se pueden clasificar a los reactores<sup>90</sup>; entre ellos:

- Por el uso a que se destine el reactor:
  - Académico, investigación, producción de plutonio, producción de energía, etc.
- Por la naturaleza de los neutrones que provocan la fisión nuclear:
  - Rápidos, intermedios, térmicos.
- Por la naturaleza y el empleo del combustible:
  - Natural, enriquecido, heterogéneo, homogéneo.
- Por el tipo de construcción (vasija cerrada, piscina, etc).
- Por la potencia y flujo de neutrones.
- Por generación (I, II, III y IV).

Sin embargo las clasificaciones más comunes se determinan a partir del tipo de combustible o por el tipo de refrigerante y moderador:

**Figura 3.3 Clasificación de los Reactores Nucleares<sup>91</sup>**

TIPO DE REACTOR	PROPÓSITO	TIPO DE REFRIGERANTE	TIPO DE MODERADOR	COMBUSTIBLE	GRADO DE ENRIQUECIMIENTO	CICLO DE VAPOR
Reactores de Agua en Ebullición (BWR)	Producción de electricidad	Agua	Agua	Dióxido de Uranio	Bajo	Ciclo directo
Reactores de Agua a Presión (PWR)	Producción de electricidad y en embarcaciones	Agua	Agua	Dióxido de Uranio	Bajo	Ciclo indirecto
Reactores de agua pesada (HWR)	Producción de electricidad y de Plutonio	Agua pesada	Agua pesada	Dióxido de Uranio, Metal	Uranio natural	Ciclo indirecto (CANDU)
TIPO DE REACTOR	PROPÓSITO	TIPO DE REFRIGERANTE	TIPO DE MODERADOR	COMPOSICION DEL COMBUSTIBLE	GRADO DE ENRIQUECIMIENTO	
Enfriados c/gas Moderados c/grafito	Producción de electricidad	Gas (helio o dióxido de carbono)	Grafito	Dicarburo de uranio o uranio metálico	Ligeramente enriquecido	Usado en Gran Bretaña y Francia
Enfriados c/agua Moderados c/grafito	Producción de electricidad y de Plutonio	Agua	Grafito	Dióxido de uranio o metálico (RBMK)	Ligeramente enriquecido y nat.	Unión Soviética Hanford (USA)
Enfriados c/metal líquido	Producción de electricidad y de Plutonio	Sodio líquido o fundido	No se requiere	Dióxidos de uranio y plutonio	Mezclas de uranio-235 y plutonio-239	Phenix en Francia

<sup>90</sup> Para mayor detalle sobre algunas clasificaciones, así como la evolución de los reactores, puede consultarse Samuel Glasstone, Ingeniería de Reactores Nucleares, Editorial Reverté, 2005.

<sup>91</sup> Juan Luis Francois L. Apuntes de Fundamentos de Energía Nuclear, Tecnología de Reactores.

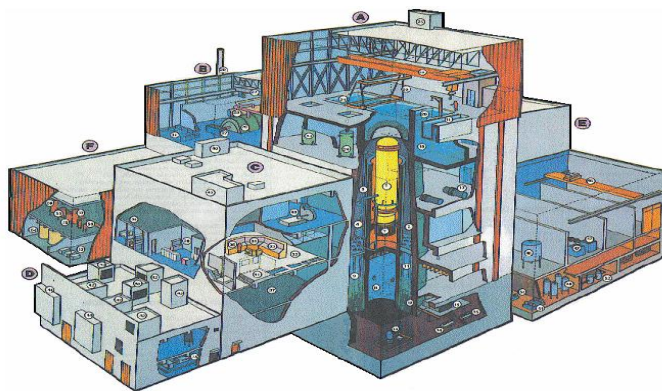
### 3.2 CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE (CNLV)

La CNLV se encuentra ubicada sobre la costa del Golfo de México en el kilómetro 42.5 de la carretera federal Ciudad del Carmen-Nautla en la localidad Punta Limón en el municipio de Alto Lucero, en el Estado de Veracruz



Consta de dos unidades, cada una con capacidad efectiva de 682.44 [MW] netos y una potencia térmica de 2027 [MW], equipadas con reactores que operan con Uranio enriquecido como combustible y agua en ebullición como moderador y refrigerante. En general ambas unidades cuentan con las características de la tecnología BWR (Reactores de Agua en Ebullición).

- La unidad 1 inició su operación comercial el 14 de agosto de 1990 y tiene la siguiente estructura<sup>93</sup>: **Figura 3.5 Distribución de la Unidad Uno de la CNLV**



Edificio del reactor (Unidad 1)

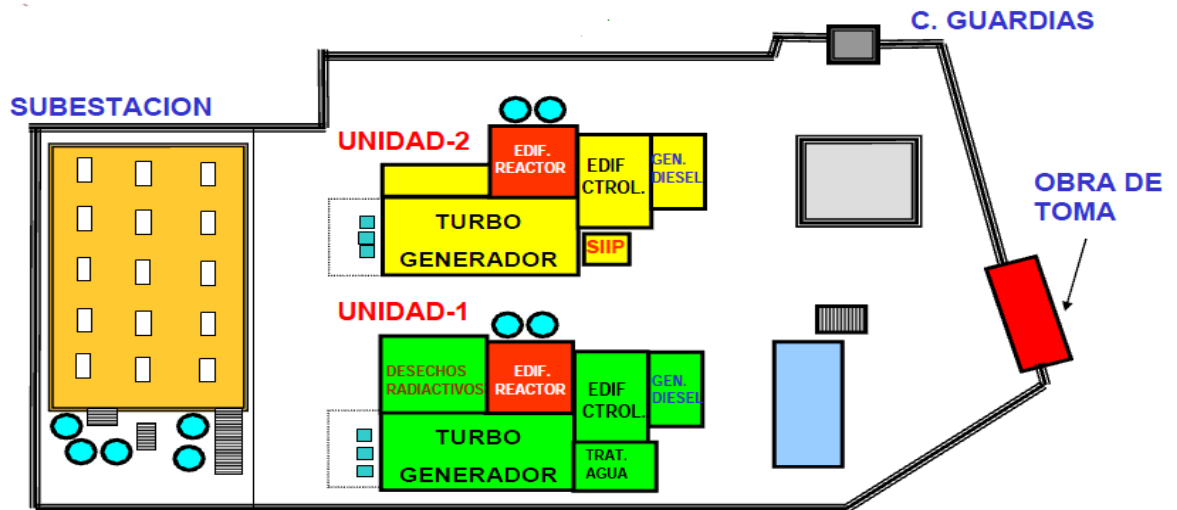
- A. Edificio del reactor
- B. Edificio del turbogenerador
- C. Edificio de control
- D. Edificio de generadores diesel
- E. Edificio de tratamiento de residuos
- F. Edificio de la planta de tratamiento de agua y taller mecánico

<sup>92</sup> Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE 2010-2024).

<sup>93</sup> Publicaciones de CFE, Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, México, 1999.

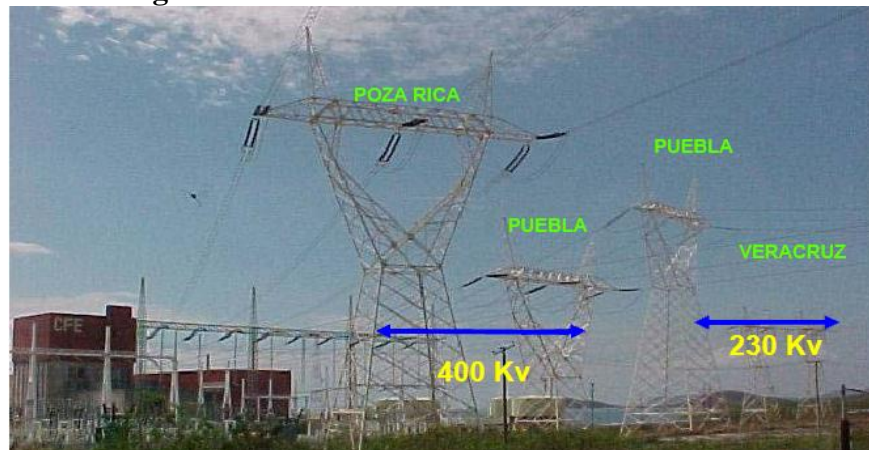
- La unidad dos inició su operación comercial el 12 de abril de 1995, tiene sus propios edificios análogos a la unidad uno y ambos comparten edificios de tratamiento de residuos radiactivos, el de la planta de tratamiento de agua y el del taller mecánico.

Figura 3.6 Distribución de la Planta Unidades 1 y 2 de la CNLV<sup>94</sup>



La energía eléctrica que genera ambas unidades fluye a través de la subestación elevadora que se conecta a la red eléctrica nacional mediante dos líneas de transmisión de 230 (Kv) a la subestación Veracruz II, así como con 3 líneas de transmisión de 400 Kv; dos a la subestación Puebla II y la tercera a la Subestación Poza Rica II. De esta manera la CNLV contribuyen con el 2.73% de la capacidad instalada de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), esto incluye a los productores independientes de energía; y aportan a la generación de energía del sistema eléctrico nacional en un 4.89 %.

Figura 3.7 Líneas de Transmisión de la CNLV



<sup>94</sup> Publicaciones de CFE, Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, México, 1999.



### 3.2.1 Ciclo Termodinámico<sup>95</sup>

La función principal de la CNLV es la producción de energía eléctrica. La producción de electricidad es generada, como se mencionó antes, a través de un reactor de agua en ebullición (BWR). El fluido principal o refrigerante de este tipo de reactor es el agua, la cual debe ser de alta pureza química, debido a que actúa como medio de enfriamiento del núcleo.

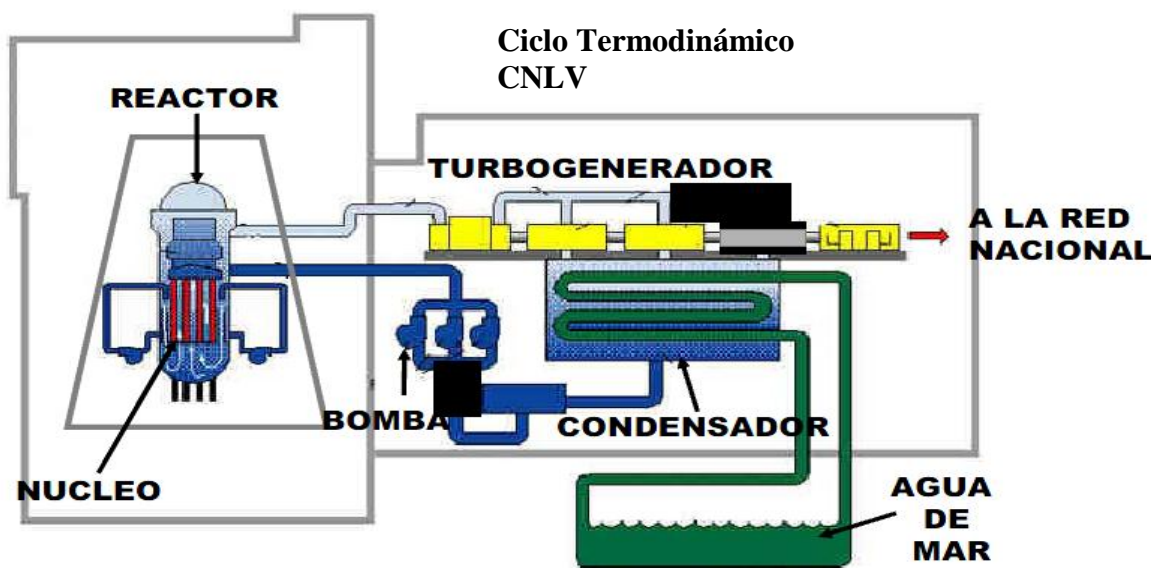
El agua refrigerante sigue un circuito cerrado, a través del cual extrae el calor que se produce por la fisión en el núcleo, luego transporta esa energía térmica a la turbina donde se convierte en energía eléctrica. Posteriormente regresa al reactor para enfriar al núcleo y así sucesivamente.

Para realizar la descripción del ciclo termodinámico, se comenzará por las tuberías de entrada a la vasija del reactor. Dentro de la vasija, el agua enfría de manera homogénea al núcleo, y pasa del estado líquido al gaseoso, formando vapor de agua. Este vapor así generado pasa a través de un conjunto de separadores y secadores de vapor donde se elimina la humedad y se obtiene un vapor seco, con una calidad del 99.9%. El vapor seco es transferido a la turbina de alta presión por medio de tuberías de vapor principal.

De la turbina de alta presión, el vapor pasa hacia un separador de humedad y separador para luego dirigirse a la turbina de baja presión. La energía cedida por el vapor en las turbinas es convertida en energía eléctrica en el turbogenerador.

El vapor que sale de la turbina de baja presión es convertido en agua en el condensador principal, el cual opera al vacío y es enfriado por agua de mar. Al salir el agua del condensador pasa por un tratamiento químico (desmineralizadores) para alcanzar nuevamente el alto grado de pureza requerido. El agua es calentada y bombeada de regreso hacia la vasija del reactor para completar el ciclo.

**Figura 3.8 Ciclo Termodinámico de la CNLV**



<sup>95</sup> CENAPRED, Manual del participante, Introducción a la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, 2009.

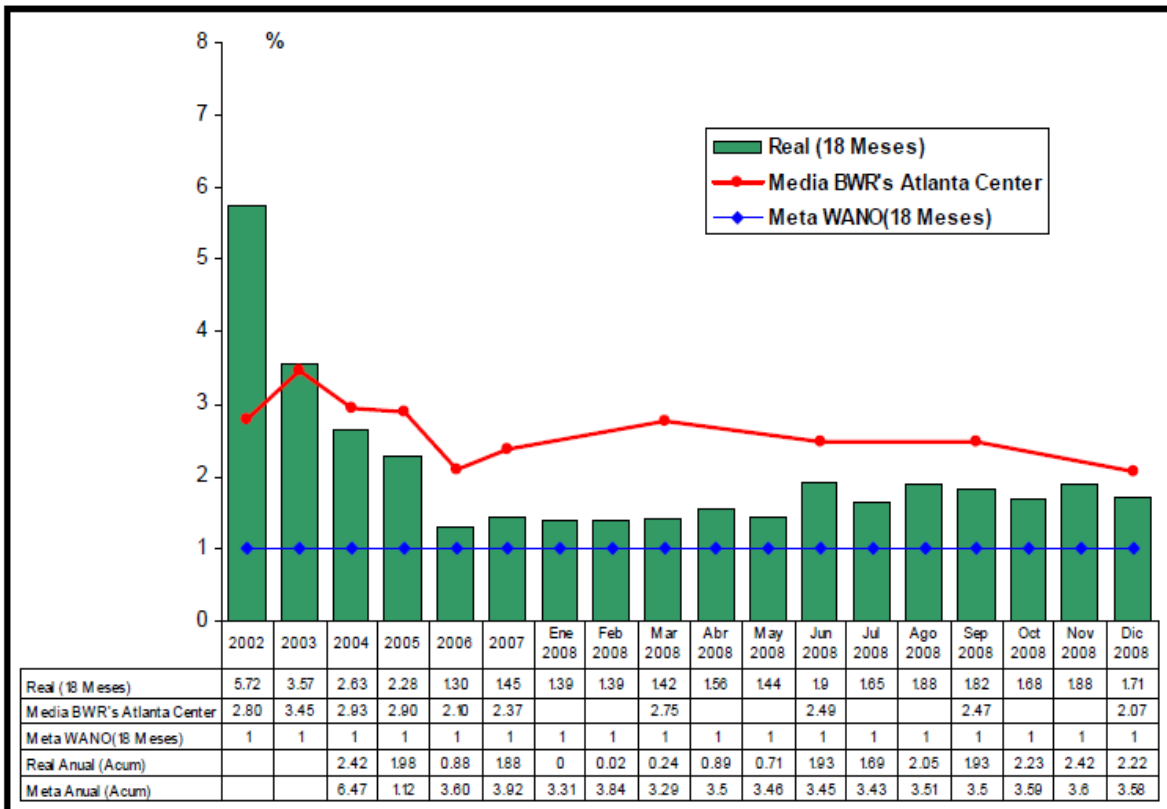
### 3.2.2 Índices e Indicadores de la CNLV

La operación de los dos reactores de la central nucleoelectrónica en Veracruz ha representado un éxito, basta con ver los resultados de comparaciones referenciales con plantas de su tipo que operan en otros países. A continuación se presentan los resultados obtenidos en los Indicadores más relevantes para esta tesis<sup>96</sup>, para ellos se decidió utilizar los Indicadores de Comportamiento establecidos por la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO) comparados en todos los casos con la meta comprometida, o bien con la media de WANO.

- Porcentaje de Energía perdida por falla (FLR): Es respecto a la energía teórica de referencia, que incluye las pérdidas planeadas y la extensión de recarga:

$$FLR = \frac{\text{Energía generada por falla}}{[\text{Energía de Referencia} - (\text{Pérdidas por Energía Planeada} - \text{Pérdidas por Ext. Recarga})]}$$

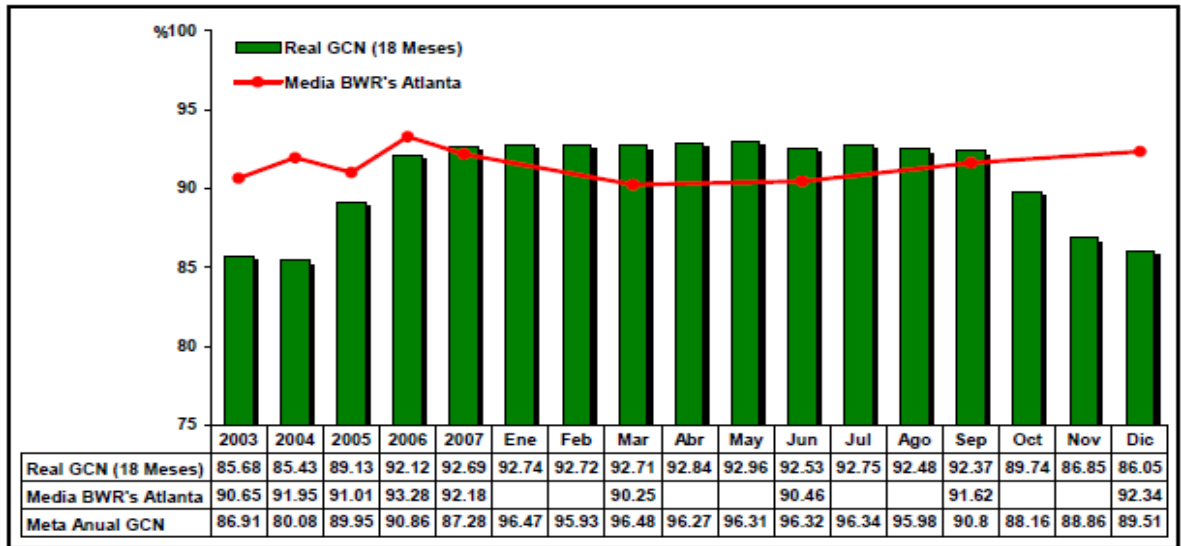
Figura 3.9 Porcentaje de Energía Perdida por Falla



<sup>96</sup> Todos los datos y gráficas sobre indicadores se han tomado del Libro, La Nucleoelectricidad una oportunidad para México, presentado por la Academia de Ingeniería de México, Octubre del 2009. Se invita al lector a consultar esta bibliografía si requiere de mayores indicadores a los presentados en esta tesis.

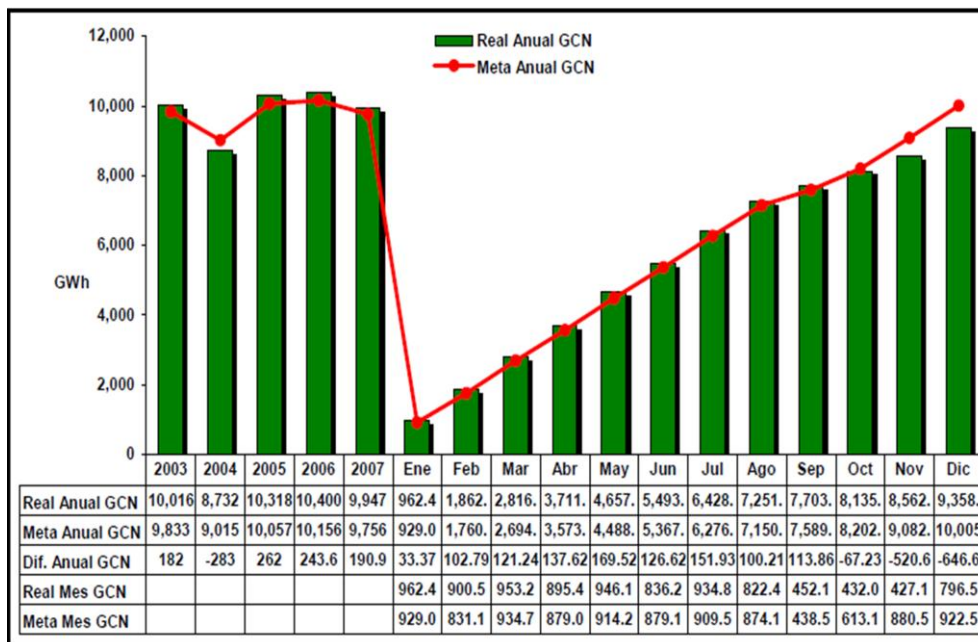
- Factor de Capacidad: Es la relación de la generación de energía disponible en un periodo, con respecto a la generación teórica de referencia. La energía de referencia es determinada por la capacidad efectiva de la unidad (682.44 MW).

Figura 3.10 Factor de Capacidad

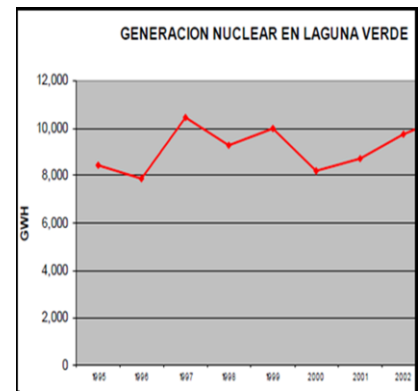


- Volumen de Energía Neta Producida: Se mide en función de dar con el cumplimiento a la meta comprometida en el contrato cliente-proveedor con el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Esta energía es medida en el integrador Omnipotencihorímetro (OPH) que es un medidor digital de energía eléctrica.

Figura 3.11 Volumen de Energía Neta Producida



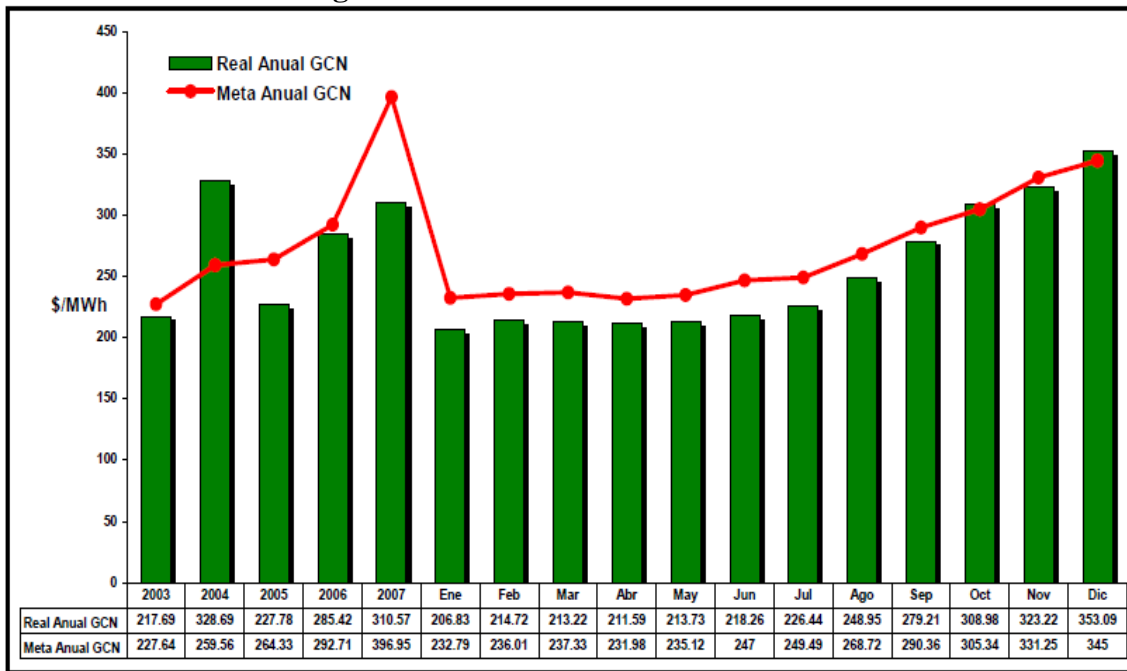
Datos de 1995-2002



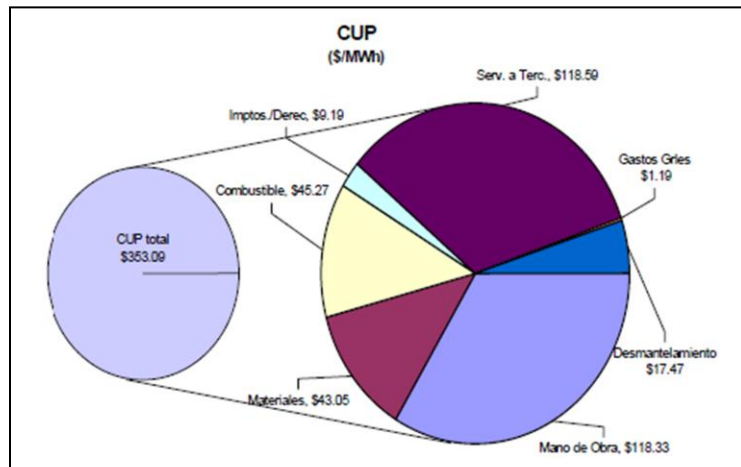
- Costo Unitario de Producción (CUP): Considerado como el costo de mano de obra (prestaciones y salarios), materiales, combustible, impuestos y derechos, servicios a terceros y costos generales. Que son necesarios para generar una unidad de producto.

$$CUP = \frac{\text{Costo de Producción Acumulado}}{\text{Generación Neta Acumulada}}$$

Figura 3.12 Costo Unitario de Producción



El costo Unitario de Producción puede expresarse de manera desglosada por concepto, para dar una idea al lector sobre los porcentajes de cada rubro, se presentan los resultados que se dieron en Enero-Diciembre del 2008:

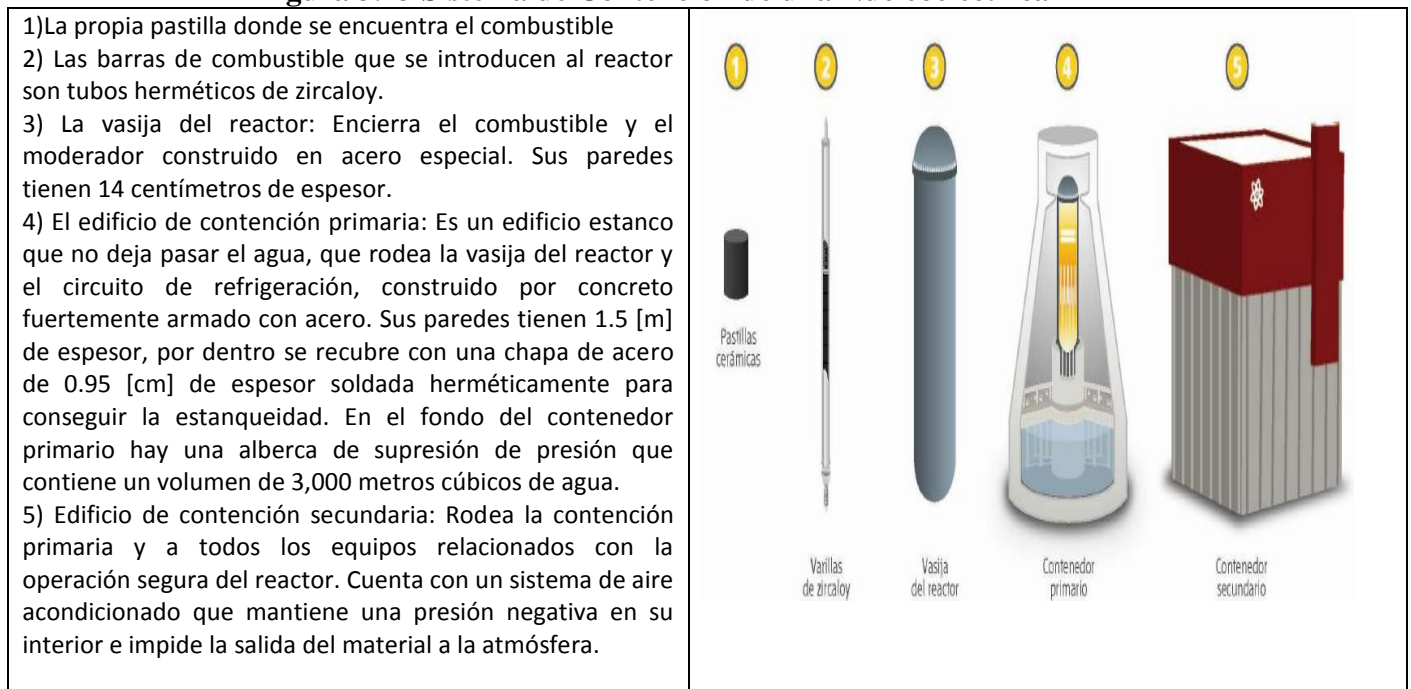




### 3.2.3 Seguridad Radiológica

La CNLV al ser una nucleoelectrica no produce gases de efecto invernadero durante toda la etapa de generación eléctrica. De hecho en el área de energía nuclear el término de contaminación se refiere a la presencia indeseable de sustancias radiactivas en seres vivos, objetos, materiales o en el ambiente. En la central Nucleoelectrica Laguna Verde se tiene control de la contaminación en todo momento a través de su sistema de contención, constituido por una serie de barreras que impiden el escape de la radiación y la confinación de los productos de fisión, diseñadas bajo la filosofía de Seguridad a Profundidad. Con este sistema escalonado de barreras se busca reducir al mínimo toda exposición a las radiaciones durante la operación normal y en caso de accidente. Estas barreras son cinco:

**Figura 3.13 Sistema de Contención de una Nucleoelectrica**

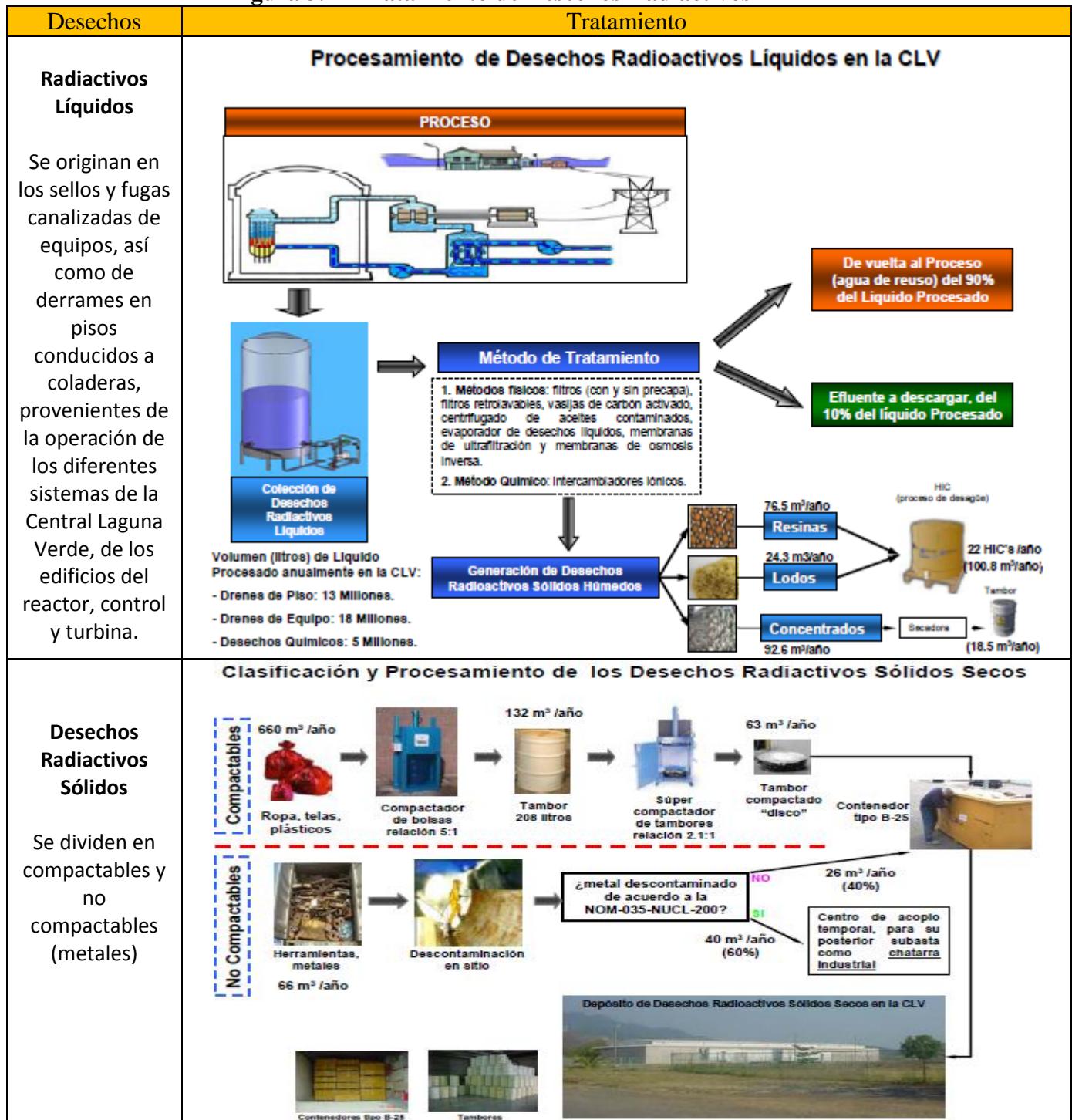


Como resultado de la operación de la Central Laguna Verde se generan desechos líquidos y sólidos, además de aceites gastados. Estos desechos radiactivos son procesados a través de sistemas de tratamiento<sup>97</sup> con el objetivo minimizar su volumen y reciclar la mayor cantidad de agua posible.

<sup>97</sup> Los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos en Laguna Verde están diseñados y operan de tal modo que:

- La dosis por radiación al medio ambiente por la descarga de cualquier efluente de material radiactivo durante la operación normal de la central no excede los límites administrativos establecidos por la CLV, ni los límites establecidos en el Apéndice I de la Parte 50 del 10CFR (norma establecida por el organismo regulador en Estados Unidos y adoptado por el organismo regulador mexicano).

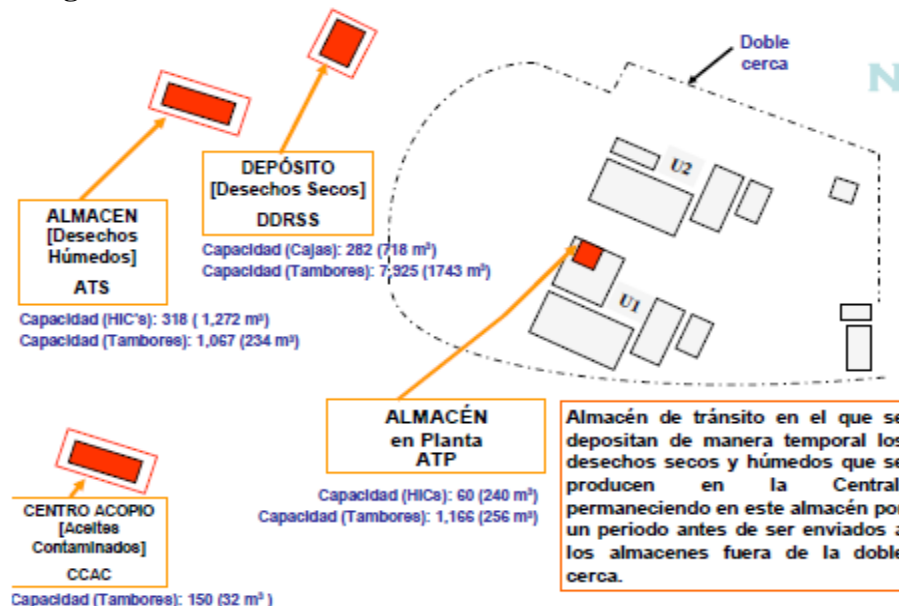
Figura 3.14 Tratamiento de Desechos Radiactivos



- La descarga de material radiactivo durante accidentes postulados estará limitada por lo establecido en la Parte 100 del 10CFR (regulación americana adoptada por el organismo regulador mexicano).



Figura 3.15 Almacenes de Desechos Radiactivos de la CNLV<sup>98</sup>



















El combustible una vez que sale del reactor, es almacenado en seco internamente en la central de manera temporal, garantizando el nulo contacto con el ambiente. Este combustible, denominado combustible gastado será posteriormente debidamente acondicionado y dispuesto en un depósito definitivo, como lo puede ser un Almacenamiento geológico profundo.

<sup>98</sup> La información de los desechos radiactivos y su tratamiento ha sido tomada de Rafael Fernández de la Garza, César F. García y otros, La Nucleoelectricidad una oportunidad para México, Academia de Ingeniería de México, 2009.

### 3.2.4 El camino hacia la Excelencia

Parte del éxito de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde consiste en que cumple con los estándares de calidad y seguridad exigidos tanto por el Organismo Internacional de Energía Atómica como por la Asociación Mundial de Operadores de Plantas Nucleares. Además cuenta con la certificación del Organismo Regulador Nuclear Mexicano y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS). Gracias a eso la CNLV ha obtenido premios, certificaciones y reconocimientos desde 1995 que se conjuntó la unidad dos, hasta la fecha<sup>99</sup>:

**Figura 3.16 Excelencia en la CNLV**

1995	1997	1999	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010			
		 4			 3		 2						Nivel de WANO	
													Premio Asia – Pacífico a la calidad	
													Premio Iberoamericano a la calidad 2009	
													Reconocimiento anual como Empresa Socialmente Responsable	
													Premio Nacional de Calidad 2007	
													Reconocimiento de Excelencia Ambiental	
													Acreditación del Laboratorio de Metrología	
													Certificación de Industria Limpia	
													Seguridad Industrial, NMX-SAST-001:2008	S A C P A S I
													norma de calidad ISO 14001 (protección ambiental)	
													Norma de Calidad, ISO 9001:2008	
													Calidad Total	
													Acreditación del Laboratorio de Ingeniería Ambiental por la Entidad Mexicana de Acreditación	
													Estándares Nucleares Internacionales	21

<sup>99</sup> Presentación del XIV Convención Iberoamericana de Excelencia, FUNDIBEQ, Septiembre/2010.

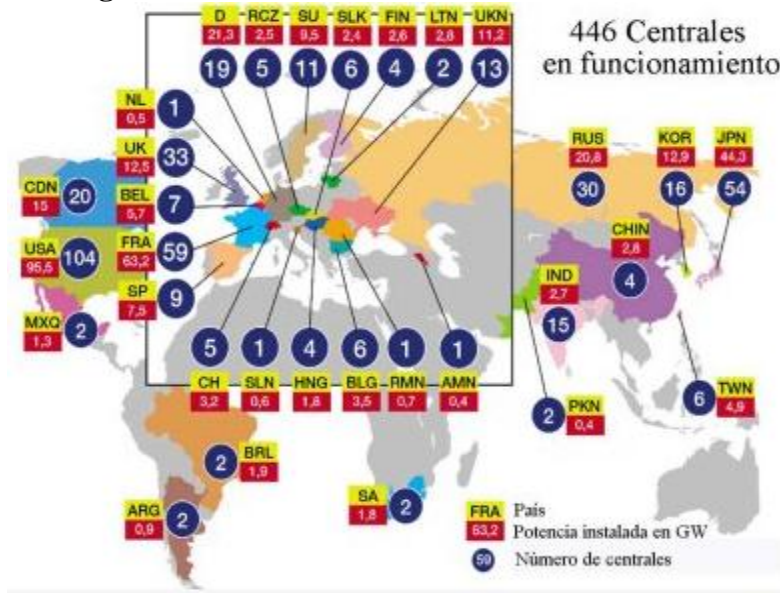


### 3.3 PROPUESTA DE EXPANSIÓN DE LA CENTRAL NUCLEOLÉCTRICA LAGUNA VERDE (CNLV)

La Estrategia Nacional Energética establece en su horizonte a mediano plazo, alcanzar hacia el año 2024 el 35% de la capacidad instalada con energías limpias, entre ellas la energía nuclear, a fin de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)<sup>100</sup>.

Actualmente existen en operación 446 reactores de generación nucleoelectrónica en el mundo:

Figura 3.17 Centrales Nucleares en el Mundo



En México, la prospectiva de la energía nuclear apunta hacia la expansión de la Central Nucleoelectrónica Laguna Verde con un tercer reactor para el año 2012, que sea el detonador de un programa integrado que permita dos años después la construcción un segundo reactor en Veracruz y cuatro reactores más terminados para el 2024, teniendo como esquema de planeación:

Figura 3.18 Escenarios de un Programa Nuclear Integral



	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Laguna Verde III		1 año	3 años					5 años						
Laguna Verde IV			1 año	2 años 6 meses				4 años 9 meses						
Golfo I			3 años			2 años 6 meses		4 años 9 meses						
Golfo II							1 año	2 años		4 años 9 meses				
Pacífico I			3 años			2 años 6 meses		4 años 9 meses						
Pacífico II							1 año	2 años		4 años 9 meses				

<sup>100</sup> Plan Nuclear, Presentación SENER, Junio del 2010

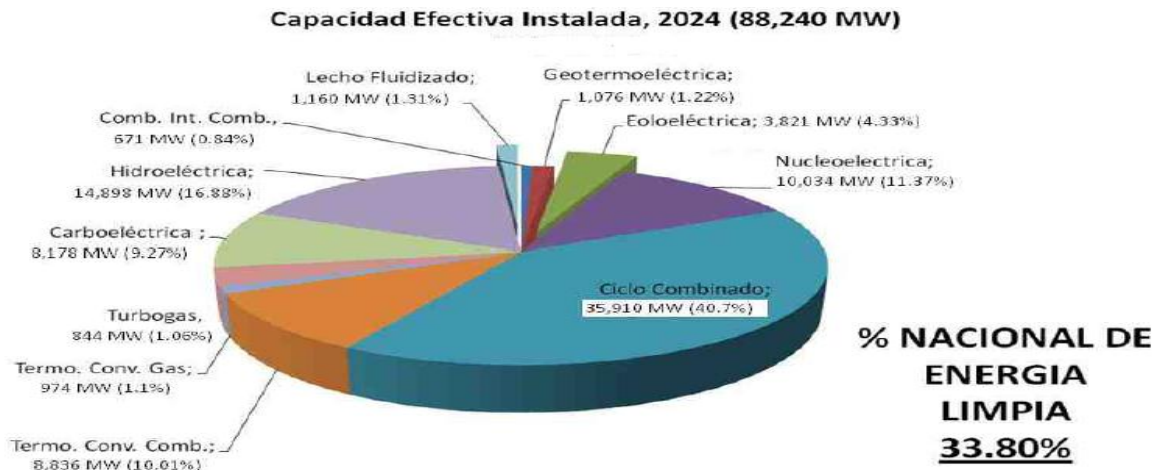
Los primeros dos reactores se contemplan en Veracruz, aprovechando en su totalidad las características del sitio de Laguna Verde, para los cuatro restantes, se han propuesto sitios presentados en el siguiente mapa:

**Figura 3.19 Propuesta de Sitios para futuras Plantas Nucleares en México**



De llevarse a cabo este plan integral en México, con la adición de reactores, la contribución de la nucleoelectricidad pasaría de un 2.73% de la capacidad instalada de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que genera actualmente a un 11.37% para el año 2024, cubriendo con esto casi el 35% de la capacidad instalada con energías limpias y cumpliendo con la meta planteada en la Estrategia Nacional Energética<sup>101</sup>.

**Figura 3.20 Proyección de la Capacidad Efectiva Instalada al año 2024**



<sup>101</sup> Presentación SENER, Propuesta de escenarios, Junio 2010

### 3.4 APLICACIÓN DE OPCIONES REALES

A lo largo de este capítulo se ha presentado un panorama general de la Energía Nuclear, dando énfasis tanto a los reactores como al funcionamiento y desempeño de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, con el objetivo de brindar un contexto que permita al lector de esta tesis entender la obtención de los datos que se requieren en la Teoría de Opciones Reales para la construcción de un árbol binomial que permitirá conocer analítica y gráficamente si existe viabilidad o no en la propuesta de expansión de un tercer reactor denominado Laguna Verde III.

#### 3.4.1 Metodología del Cálculo de las variables del Modelo Binomial

También se han explicado a detalle en el capítulo dos de esta tesis las variables que hacen posible la modelación binomial que incluye flexibilidad y riesgo en los proyectos a valorar. Para la expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, estas variables son:

##### 3.4.1.1 Valor Esperado del Activo Subyacente (S)

Dado que la Opción Real de expansión es análoga a una Opción de Compra Americana, la planta Nuclear Mexicana tiene el derecho de adquirir como activo los flujos de fondo futuros que se generarán como resultado de la implementación de un tercer reactor. El valor del activo subyacente está dado por el valor Presente Neto de la Inversión, previo a la ampliación, es decir calculado a partir de lo generado en la Planta con la operación de los dos reactores nucleares ya instalados. Por lo tanto su cálculo será estimado como:

$$VPN = \sum_1^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1+WACC)^n} - Inversión_{inicial}$$

Donde la Tasa de Rendimiento Mínimo Aceptable (WACC) está fijada por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)<sup>102</sup> en 12% a pagar a 20 años. La inversión inicial fue de 3 mil 500 millones de dólares y los reactores de la CNLV cuentan con una licencia de operación de 30 años otorgada por el organismo regulador nuclear mexicano, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS)<sup>103</sup>.

<sup>102</sup> La Central Nucleoeléctrica Laguna Verde es administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas. Hasta los años noventa, el financiamiento de los proyectos de generación de energía estaba a cargo de la CFE con el respaldo del Gobierno Federal. Bajo este esquema la tasa WACC se compone solo del Costo de las Utilidades Retenidas de la Comisión Federal Electoral.

<sup>103</sup> [www.ai.org.mx](http://www.ai.org.mx)

Como la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde es administrada y operada por la Comisión Federal de Electricidad, actualmente solo se tiene información pública de los montos destinados a la energía nuclear, pero no se detalla a partir de los informes anuales publicados por la CFE<sup>104</sup> los flujos que genera la producción de electricidad en la Central Nucleoeléctrica Nacional. Por lo cual para los fines de esta tesis, los flujos históricos que ha generado la CNLV estarán estimados a partir de los egresos e ingresos generados en función del volumen de energía neta producida anualmente, así como de datos económicos y técnicos conocidos.

Así el flujo de Efectivo será:

$$\text{Flujos de Efectivo} = \text{Ingresos} - \text{Egresos};$$

- Egresos = Gastos Fijos + Gastos Variables
- Gastos Fijos = Gasto fijo anual de operación y mantenimiento
- Gastos Variables:

Gasto variable anual de operación y mantenimiento + Gasto variable anual por combustible

- Ingresos = Volumen de Energía Neta Producida x Precio de venta

**Figura 3.21 Datos Económicos y Técnicos conocidos de la CNLV**

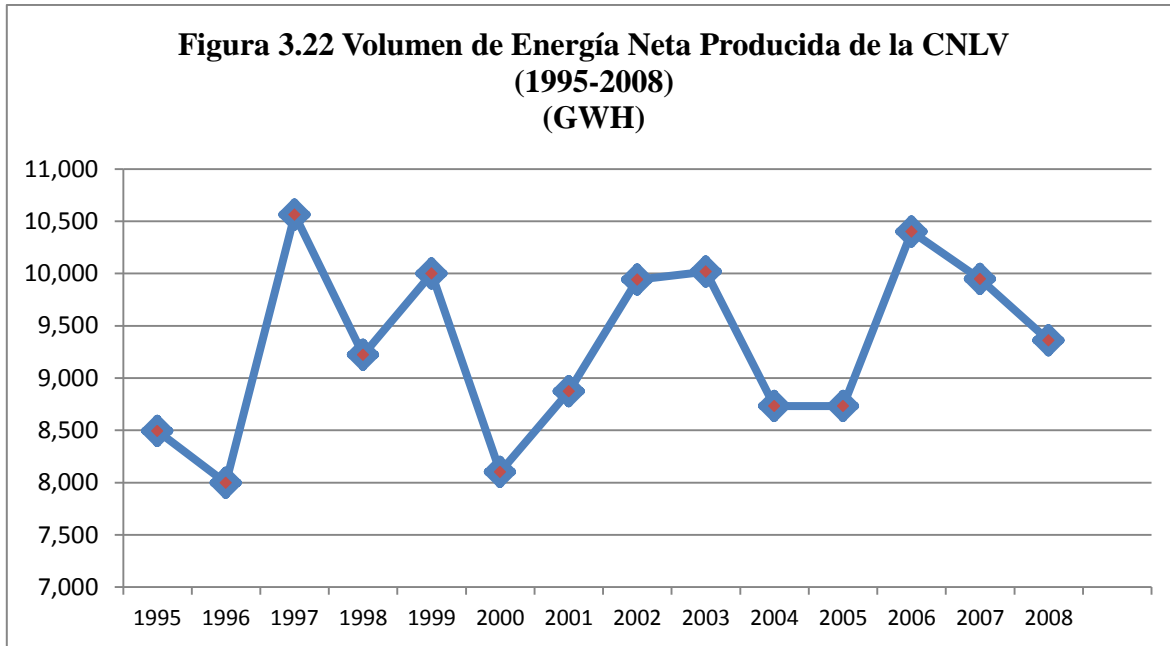
Datos	Valores Registrados
Costo Unitario fijo de Operación y mantenimiento	54.45 (USD/año-kW)
Costo Variable	0.38 (USD/MWh)
Costo del Uranio	3, 800 (USD/kg U)
Quemado del combustible	46.500 (MWd/kg U)
Consumo específico de combustible	10.869 (GJ/MWh)
Precio de Venta	80.72 (USD/MWh)

Retomado los valores proporcionados en los índices e indicadores de la CNLV establecido en el apartado 3.2.2 de este capítulo, el Volumen de Energía Neta Producida anualmente fue<sup>105</sup>:

<sup>104</sup> Los informes anuales de la CFE se pueden encontrar en la dirección: <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/publicaciones/Paginas/Publicaciones.aspx>

<sup>105</sup> Elaboración propia a partir de las dos gráficas presentadas en el apartado 3.2.2, con los datos de 1995-2002 y tomando el volumen de energía neta producida real anual para los años 2003-2008.





Los egresos e ingresos en función del volumen de energía neta producida, generan los siguientes flujos de efectivo históricos:

**Figura 3.23 Flujos de Efectivo Históricos de la CNLV**

Año	Ingresos (MUSD)	Egresos (MUSD)	Flujos de Efectivo (MUSD)	Año	Ingresos (MUSD)	Egresos (MUSD)	Flujos de Efectivo (MUSD)
1995	685.543	-164.856	<b>520.687</b>	2003	808.477	-181.091	<b>627.385</b>
1996	645.587	-159.579	<b>486.008</b>	2004	704.834	-167.404	<b>537.431</b>
1997	852.468	-186.901	<b>665.567</b>	2005	832.854	-184.311	<b>648.543</b>
1998	744.467	-172.638	<b>571.829</b>	2006	839.473	-185.185	<b>654.288</b>
1999	807.185	-180.921	<b>626.265</b>	2007	802.907	-180.356	<b>622.551</b>
2000	653.820	-160.666	<b>493.154</b>	2008	755.364	-174.077	<b>581.287</b>
2001	716.135	-168.896	<b>547.239</b>				
2002	802.504	-180.303	<b>622.201</b>				

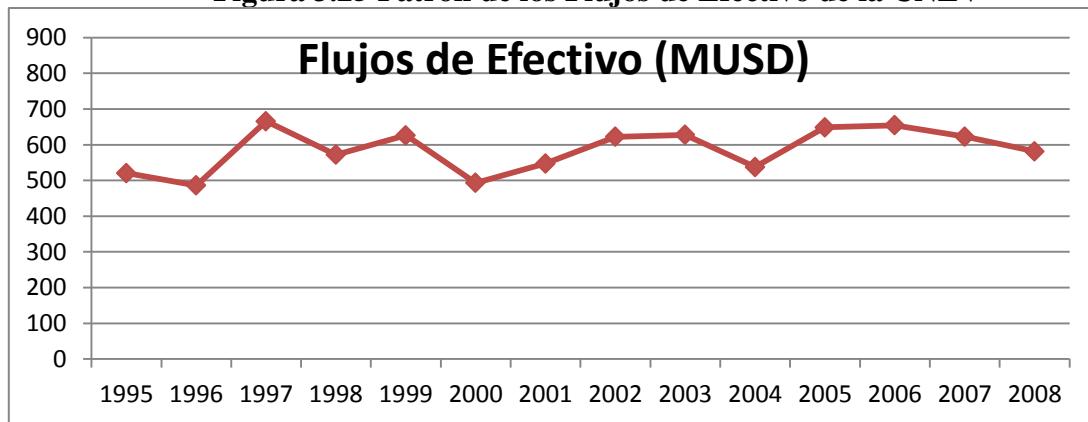
Para conocer los flujos futuros que se descontarán a la tasa del 12% y darán valor al activo subyacente (S) se usarán pronósticos. Un pronóstico es un proceso de estimación de un acontecimiento futuro, proyectando datos del pasado. Existen dos tipos de pronósticos<sup>106</sup>:

**Figura 3.24 Clasificación de los Pronósticos**

Pronósticos	Modelos		Descripción
Cualitativos	<b>Método Delphi</b>		Preguntas hechas a un grupo de expertos para recabar opiniones.
	<b>Datos Históricos</b>		Hace analogías con el pasado de algo similar.
	<b>Técnica de Grupo Nominal</b>		Proceso de grupo que permite la participación con votación forzada.
	<b>Investigación de Mercado</b>		Se recopilan datos de varias maneras para probar hipótesis sobre el mercado.
Cuantitativos	Series de Tiempo	<b>Media o Promedio Móvil</b>	Promedia los datos del pasado para predecir el futuro basándose en ese promedio.
		<b>Suavizado Exponencial</b>	Da pesos relativos a pronósticos anteriores y a la demanda más reciente.
	Causales	<b>Análisis de Regresión</b>	Describe una relación funcional análisis de regresión entre las variables.
		<b>Modelos Económicos</b>	Proporciona un pronóstico global para variables tales como el Producto Interno Bruto (PIB).

Si consideramos que los flujos de efectivo históricos de la CNLV muestran un patrón constante como se observa en la gráfica y además se pretende que proyecten flujos futuros de manera cuantitativa, es conveniente para pronosticar usar el modelo de suavizado exponencial simple para que los datos del pasado se combinan sistemáticamente en forma predeterminada para eliminar el patrón de aleatoriedad, ajustando a un patrón organizado a través de una constante  $\alpha$ .

**Figura 3.25 Patrón de los Flujos de Efectivo de la CNLV**



<sup>106</sup> Miguel Oliveros, Administración de la Producción y las Operaciones I, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad de los Andes.

El modelo de suavizado exponencial simple se distingue por la manera tan especial de dar peso a cada uno de los datos anteriores, la información de los periodos más recientes reciben un peso mayor y se usa un pronóstico previo. Se describe por la ecuación:

$$F_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)F_t$$

Donde:

- $t$  : Indica cada periodo
- $F_{t+1}$ : Es el dato próximo a pronosticar. Para este caso representará el flujo de efectivo del año siguiente al conocido.
- $\alpha$ : Es la constante de suavizado, su valor se encuentra entre 0 y 1. Esta constante permite ajustar los datos a un patrón. Para pronosticar los flujos futuros de la CNLV se usará un  $\alpha=0.7$  considerada como una  $\alpha$  grande (valores superiores al 0.5) que indica que existen factores que pueden cambiar el efecto de los flujos futuros.
- $X_t$ : Representa el dato conocido más reciente. Dentro de los datos históricos estimados previamente, el del año 2008 equivalente a 581.287 (MUSD) es el flujo conocido más reciente en el caso de la Nucleoeléctrica<sup>107</sup>.
- $F_t$ : Es el pronóstico más reciente, calculado generalmente a través del Promedio Móvil o considerando el último dato. A medida que termina cada periodo se realiza un nuevo pronóstico. El  $F_t$  a considerar para Laguna Verde, será de 586.0311 (MUSD) que corresponde al promedio de los flujos históricos.

Teniendo claro lo anterior, se puede conocer el flujo de efectivo para el año 2009 de la siguiente manera:

$$F_{2008+1} = \alpha X_{2008} + (1 - \alpha)F_{2008}$$

$$F_{2009} = 582.71023MUSD$$

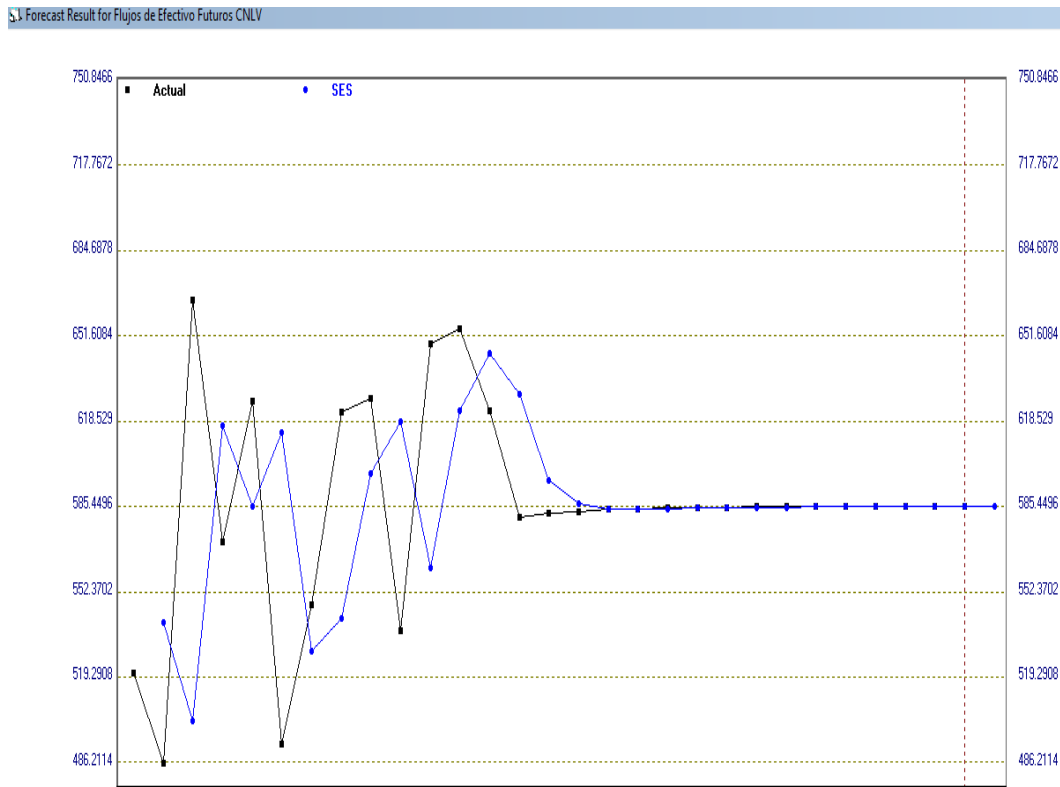
Siguiendo la misma metodología del modelo, se calcularon los flujos de efectivo futuros hasta el momento en que vence la licencia<sup>108</sup>. Considerando que ambos reactores están operando conjuntamente desde 1995 y que los datos conocidos al año 2008 reportan catorce años de uso, se han pronosticado flujos futuros a dieciséis años.

<sup>107</sup> Es importante mencionar, que el  $X_t$  inicial será obtenido de datos históricos, pero para los siguientes periodos será el dato obtenido del pronóstico  $F_{t+1}$ .

<sup>108</sup> Actualmente la licencia otorgada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) es de 30 años, sin embargo la CFE ya planea la solicitud de una extensión a la licencia de operación de los reactores de la Central Laguna. Esta extensión de tiempo está sustentada desde el punto de vista técnico que indica que los componentes principales como por ejemplo la vasija del reactor pueden continuar operando de manera confiable y segura por otros 30 años adicionales.

La siguiente gráfica muestra en negro los flujos de efectivo que se han estimado como producto de la generación de energía por parte de la CNLV, mientras que en azul se muestran las proyecciones futuras ajustadas a través de un suavizado exponencial<sup>109</sup>.

**Figura 3.26 Flujos de Efectivo Futuros de la CNLV**



Por último con la sustitución de los valores obtenidos, se tiene que el Valor Presente Neto que representa el activo subyacente está dado por:

Donde:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{Flujos_{efectivo}}{(1 + WACC)^t} - Inversión_{inicial}$$

$$VPN = 6,653.94$$

VPN: Es calculado desde el momento en que se generó flujos de efectivo con ambos reactores y se consideró un periodo de 30 años (vigencia de licencia de operación).

Inversión Inicial: 3,500 MUSD

WACC: 12% fijada a 20 años por la CFE

Flujos de Efectivo: Tomados de los pronósticos calculados y de los históricos

<sup>109</sup> Programa Win QSB (Quantitative System Business). Es una aplicación creada por el Dr. Yih-Long Chang, que consta de una serie de módulos (subprogramas) que permiten resolver y automatizar algunos problemas de cálculos lineales, investigación de operaciones, planteamiento de producción, evaluación de proyectos, etc.

### 3.4.1.2 Volatilidad y constantes de multiplicación Up y Down (u y d)

Hasta ahora un VPN igual a 6,653.94 representa el valor del proyecto sin flexibilidad, esto es sin considerar que existen factores que puedan propiciar cambios en las condiciones fijadas hasta el momento. Sin embargo en la mayoría de los proyectos existe incertidumbre y riesgo marcados por los factores externos e internos que pueden cambiar el contexto de viabilidad de los proyecto en las empresas. En el caso de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, el valor del activo estará marcado por la capacidad de variación respecto a su media, a esto se le llama volatilidad. Su comportamiento puede describirse a través de un movimiento Browniano, con la ecuación estocástica:

$$\frac{ds}{s} = e^{\mu(\Delta t) + \sigma\sqrt{\Delta t}}$$

Donde:

- $e^{\mu(\Delta t)}$  : Representa la parte determinística que proyecta la tasa de crecimiento del flujo de efectivo futuros, representada por la pendiente  $\mu$  en el tiempo entre etapas  $\Delta t$ .
- $e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$  : Representa la parte estocástica que proyecta la fluctuación ( $\sigma$ ) que presentan los flujos de efectivo futuros alrededor de la pendiente en el tiempo entre las etapas  $\Delta t$ .

Partiendo del hecho que la volatilidad calculada a partir de lo estimado en esta tesis es:

$$\sigma = 0.59753998 \approx 0.60$$

Se puede determinar las constantes de multiplicación Up y down (u y d) que multiplicarán al valor del activo subyacente ( $S_0$ ) en cada rama del árbol binomial, sus valores son:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} = e^{0.60\sqrt{9/5}} = 2.23661 \approx 2.24 \quad \text{y} \quad d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = e^{-0.60\sqrt{9/5}} = 0.44709 \approx 0.45$$

Recordando que  $\Delta t$  es la longitud de cada periodo o paso temporal (variación en el tiempo) y que se define como  $\Delta t = T/n$ , donde:

- T: Representa el plazo hasta el vencimiento de la opción, en la analogía con Opciones Reales, se define como el tiempo de vigencia del proyecto, el cual para la implementación de un tercer reactor en la CNLV es de 9 años.
- n: Representa los periodos de igual longitud, análogamente en Opciones Reales, indica el número de pasos del árbol binomial. Para la propuesta de expansión se considerarán 5 pasos<sup>110</sup>.

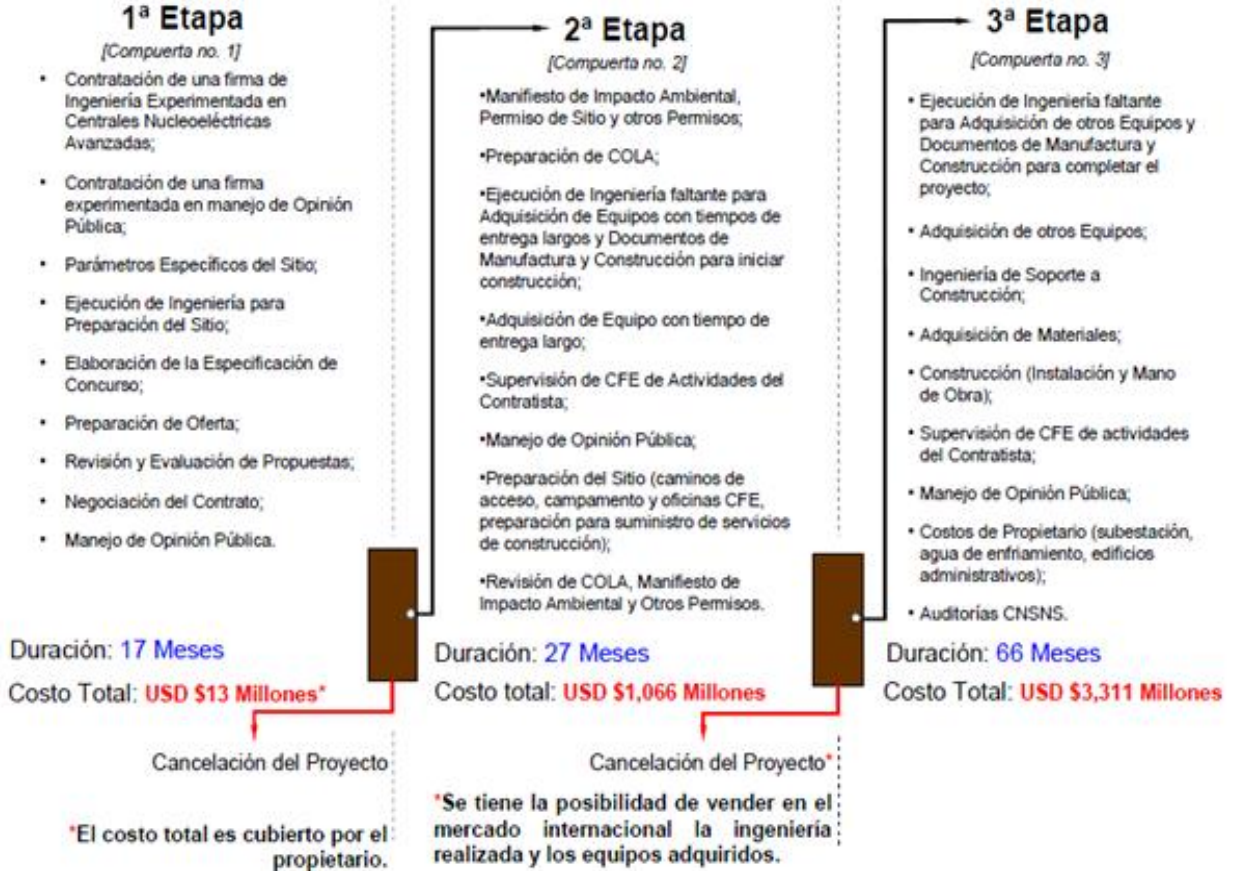
<sup>110</sup> El considerar pocos pasos, por ejemplo dos, según Hull (2006, p.p 255 y 397) se vuelve poco realista y simplista de la realidad al llegar a una aproximación poco confiable del valor de la opción ya que asume que los movimientos del activo subyacente durante la vida de la opción solamente incluyen uno o dos pasos

### 3.4.1.3 Precio de Ejercicio (X)

Lo que en la Teoría de las Opciones Financieras es conocido como el precio de ejercicio (X), en la Teoría de Opciones Reales es identificado como el costo de la inversión del proyecto. Dicho costo en la propuesta de expansión de la Central Nucleoeléctrica Mexicana corresponde al valor monetario de la implementación de un tercer reactor en Laguna Verde Veracruz.

Las cifra más reciente y debidamente documentada respecto a la estimación de una nueva unidad nucleoelectrica es de 4, 390 millones de dólares<sup>111</sup>. Esta cantidad se encuentra distribuida en las siguientes tres etapas:

**Figura 3.27 Mapa del Proyecto Administrando Riesgos mediante la Toma de Decisiones a través de Compuertas**



binomiales. El tomar 5 pasos permite tener una estimación confiable del valor de la opción y aumentar el número de pasos agrega poca precisión al valor encontrado.

<sup>111</sup> Cifra proporcionada en la publicación "The Cost of New Generating Capacity in Perspective" del Nuclear Energy Institute (NEI por sus siglas en inglés) de agosto del 2008.

El desglose del costo de inversión de un nuevo reactor nuclear de 4,390 millones es:

**Figura 3.28 Costo de Inversión de un Reactor Avanzado en la CNLV**

<b>Reactor Avanzado Nuevo en Sitio de Laguna Verde</b>	
<b>COSTOS DE INVERSIÓN</b>	<b>MILLONES DE USD</b>
<b>Costos Directos</b>	
Equipo Isla Nuclear	\$ 899.00
Equipo Balance de Planta	\$ 684.00
Materiales Isla Nuclear	\$ 250.00
Materiales Balance de Planta	\$ 273.00
Mano de Obra Isla Nuclear	\$ 700.00
Mano de Obra Balance de Planta	\$ 724.00
Ingeniería de Diseño	\$ 400.00
Administración de la Construcción	\$ 302.00
Ingeniería de Soporte a Construcción	\$ 27.00
Servicios de Arranque de Unidad	\$ 22.00
Subtotal	\$ 4,281.00
<b>Costos Indirectos</b>	
Ingeniería para preparación del sitio	\$ 2.00
Determinación Parametros Específicos del Sitio	\$ 1.00
Proceso de Licitación del Proyecto	\$ 10.00
Manifiesto de Impacto Ambiental	\$ 4.00
Preparación de Documentos de Licencia	\$ 12.00
Supervisión de CFE a Actividades del Contratista	\$ 80.00
Subtotal	\$ 109.00
<b>Gran Total</b>	<b>\$ 4,390.00</b>

Debe destacarse en este apartado que dentro de los 9 años de duración del proyecto, existen dos momentos en que puede cancelarse la opción de expansión con un tercer reactor. El primero será al término de los 17 meses, en los cuales el costo de 13 millones de dólares será cubierto por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el segundo al finalizar los 27 meses con una inversión de 1,066 millones de dólares que podrán ser recuperados con la venta internacional de los equipos adquiridos. **La opción que posee la CFE de cancelar y recuperar parte de sus activos; así como evitar el seguir con la inversión en meses posteriores, requiere de una evaluación que le permita conocer la viabilidad del proyecto por periodos y le genere la flexibilidad que le permita tomar una decisión asertiva.**



### 3.4.1.4 Tasa Libre de Riesgo y Probabilidad Neutral al Riesgo

Tanto el valor de la opción como la probabilidad ( $q$ ) de que se genere un incremento o descenso en el Valor Presente Neto de un proyecto, se encuentran definidos en función del valor de la Tasa libre de Riesgo ( $r$ ):

- Valor de la Opción: 
$$\frac{v_{t+1}^u q + v_{t+1}^d (1 - q)}{(1 + r)^{\Delta t}}$$
- Probabilidad Neutral al Riesgo: 
$$q = \frac{(1 + r)^{\Delta t} - d}{u - d}$$

En el supuesto de llevarse a cabo la construcción de un tercer reactor en Laguna Verde, la Tasa sin riesgo más idónea para su valuación con Opciones Reales es el Valor del Interés de la Deuda del Tesoro de los Estados Unidos (Interest on Treasury Debt Securities) , esto es por dos razones:

- 1) La Comisión Federal de Electricidad (CFE) contratará a una empresa de ingeniería experimentada en Centrales Nucleoeléctricas para la implementación de un tercer reactor. Para los dos reactores que operan actualmente en Veracruz, la contratación fue con General Electric<sup>112</sup>, que tiene su sede central en Fairfield, Estados Unidos, teniendo la CFE una inversión pactada en dólares con un valor de \$3 500 millones. Para esta nueva unidad nuclear, la inversión de \$4,390 millones también se ha estimado en dólares y dentro de las posibles firmas contempladas para realizar el proyecto de expansión se ha mencionado una vez más a la firma General Electric.
- 2) En la economía financiera, se consideran valores sin riesgo a los títulos emitidos por la Tesorería, en Estados Unidos son los Treasury Bills (TBs). Estos son un tipo de bonos<sup>113</sup> emitidos por el gobierno para ayudar a financiar sus operaciones, tomando prestado dinero mediante la venta a inversionistas de una variedad de empréstitos<sup>114</sup> (*debt securities*) denominados colectivamente valores del Tesoro, o más sencillamente, en inglés, *Treasuries*. Los TBs son títulos a corto plazo, similares a los Cetes (CTs) del gobierno mexicano.

---

<sup>112</sup> General Electric (GE) es uno de los mayores fabricantes de maquinaria y equipos de generación, transmisión y distribución de Electricidad. Además es una empresa de infraestructuras, servicios financieros y medios de comunicación altamente diversificada.

<sup>113</sup> Un bono es una obligación financiera contraída por el inversionista; otra definición para un bono es un certificado de deuda, es decir una promesa de pago futura documentada en un papel y que determina el monto, plazo, moneda y secuencia de pagos.

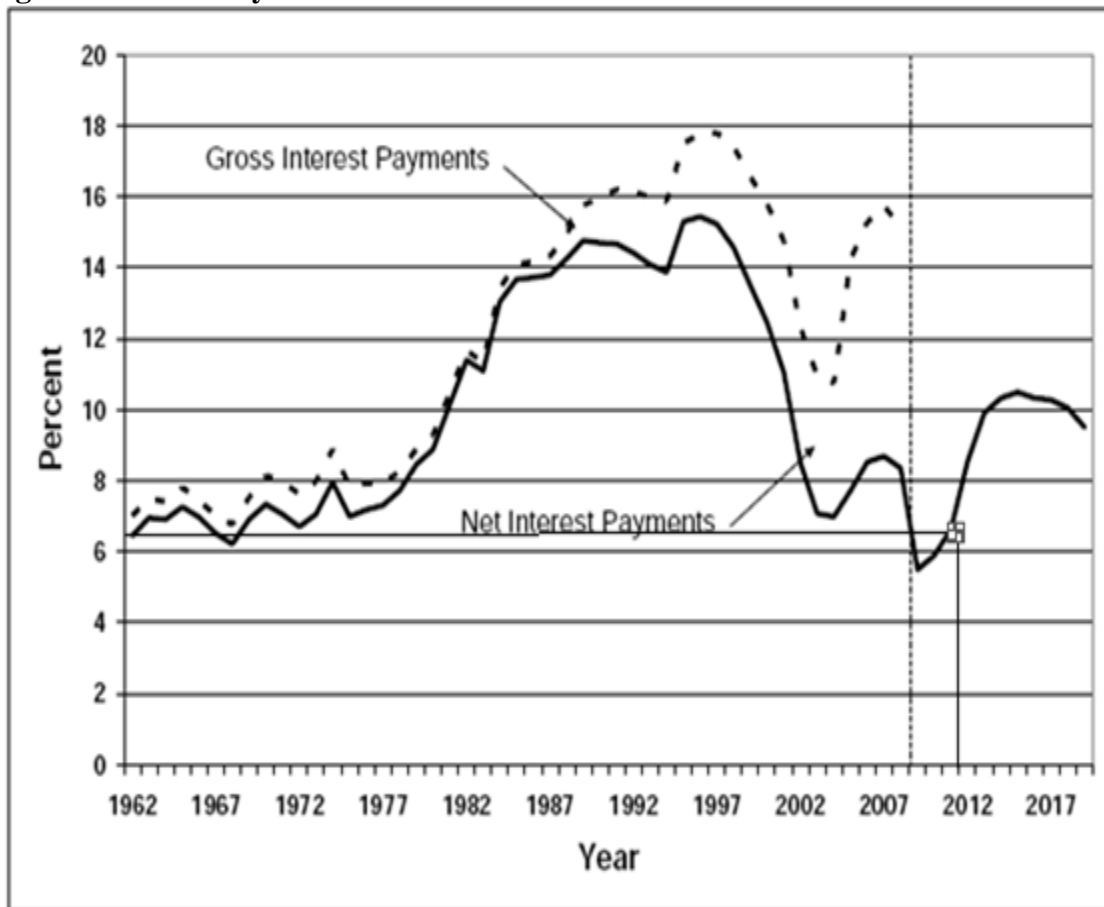
<sup>114</sup> Un empréstito es una fuente de financiación ajena dividida en partes alícuotas (iguales) llamadas obligaciones. Los empréstitos de obligaciones se solicitan debido a que las grandes empresas y entes públicos necesitan capitales de cuantía muy elevada, con lo que no les resulta fácil encontrar entidades financieras dispuestas a conceder préstamos de tales cuantías.



Los Treasury Bills ocupan un puesto especial en el mundo de las inversiones, ya que constituyen el punto de referencia para la medición de la mayoría de los otros empréstitos; son la tasa líder de la economía. A los TBs se les considera libre de riesgo, porque no existe peligro de insolvencia en ellos, puesto que cuenta con el respaldo de la autoridad de la tesorería de los Estados Unidos y representan inversiones seguras para las personas e instituciones.

En Estados Unidos, la Oficina Presidencial de Gestión y Presupuesto, OMB (Office of Management and Budget) y la Oficina del Presupuesto del Congreso, CBO (Congressional Budget Office)<sup>115</sup>, han pronosticado a través de la siguiente gráfica que para el año 2012 se tendrá un porcentaje de interés aproximado al 6.5%.

**Figura 3.29 Brutos y Netos del Interés de la Deuda del Tesoro de los Estados Unidos**



Source: OMB and CBO.

<sup>115</sup> Para mayores referencias de estas organizaciones, consultar: [www.nyc.gov/html/omb/home.html](http://www.nyc.gov/html/omb/home.html) y [www.cbo.gov](http://www.cbo.gov)

Con la Tasa Libre de Riesgo del 6.5%, se puede calcular la Probabilidad Neutral al Riesgo ( $q$ ) para el proyecto de expansión de la CNLV. Esta probabilidad estará determinada por valores entre 0 y 1 e indicará la probabilidad existente de que se genere un incremento (determinado por la constante de multiplicación  $u$ ) en el valor del activo entre el tiempo entre etapas ( $\Delta t$ ). A sí mismo el resultado de  $(1-q)$  marcará la probabilidad de que el valor del activo decrezca (en porcentaje de variación en función de la constante de multiplicación  $d$ ). Estas probabilidades para el árbol binomial de 5 pasos a construir serán:

$$q = \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d} = \frac{(1+0.065)^{(9/5)} - 0.45}{(2.24 - 0.45)} = 0.374317915$$

$$1 - q = 1 - \frac{(1+r)^{\Delta t} - d}{u - d} = \frac{(1+0.065)^{(9/5)} - 0.45}{(2.24 - 0.45)} = 1 - 0.374317915 = 0.625682085$$

### 3.4.2 Árbol Binomial

Con las estimaciones presentadas en este capítulo, solo falta definir para la construcción del Árbol Binomial, que la implementación de un tercer reactor en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde representa una expansión del 50% en referencia a sus dos reactores nucleares BWR ya existentes. Esto indica que si se decide el crecimiento de la CNLV se esperaría obtener un incremento del Valor Presente Neto de la empresa mexicana equivalente al porcentaje de dicha expansión.

Conociendo el último dato, correspondiente al porcentaje de expansión que genera la propuesta de un tercer reactor en Veracruz, se han establecido como parámetros en la construcción del Árbol Binomial:

**Figura 3.30 Parámetros del Árbol Binomial de la CNLV**

Factor o Parámetro	Valor			Factor o Parámetro	Valor
Activo Subyacente ( $S_0$ )	VPN = 6,653.94			Precio de Ejercicio	X = 4,390 MUSD
Tiempo de Vigencia del Proyecto	T = 9 años	Número de pasos del Árbol Binomial (n)	n = 5	Tasa libre de Riesgo	r = 6.5%
Longitud de cada periodo (variación en el tiempo)	$\Delta t = T/n = 9/5$			Probabilidad Neutral al riesgo	q = 0.374317915 1-q = 0.625682085
Volatilidad de los Flujos de Efectivo ( $\sigma$ )	$\sigma = 0.59753998 \approx 0.60$			Porcentaje de Expansión	K = 50%
Constantes de multiplicación (u y d)	Incremento	$u = 2.23661 \approx 2.24$			
	Decremento	$d = 0.44709 \approx 0.45$			

Para encontrar el valor de la opción, se debe primero determinar la evolución del valor de activo subyacente  $S_0 = 6,653.94$  en el tiempo:

**En el momento uno los posibles valores serán:**

El valor del activo sube:

$$S_1^u = S_0 u = 6,653.94 (2.24) = \$ 14,904.83$$

El valor del activo baja:

$$S_1^d = S_0 d = 6,653.94 (0.45) = \$ 2,994.27$$

**El valor del activo en el momento dos:**

El valor del activo subió en el periodo anterior:

El valor del activo bajó en el periodo anterior:

El valor sube:  $S_2^u = (S_0 u) u = 14,904.83 (2.24) = \$ 33,386.81$

El valor sube:  $S_2^u = (S_0 u) u = 2,994.27 (2.24) = \$ 6,707.17$

El valor baja:  $S_2^d = (S_0 d) d = 2,994.27 (0.45) = \$ 1,347.42$

El valor baja:  $S_2^d = (S_0 d) d = 2,994.27 (0.45) = \$ 1,347.42$

Siguiendo la misma metodología<sup>116</sup>, hasta el momento 5 equivalente a 9 años, se tiene el siguiente árbol binomial:

**Figura 3.31 Árbol Binomial del Activo Subyacente**

Subyacente					
momento (años)					
0	1 4/5	3 3/5	5 2/5	7 1/5	9
					\$ 375,248.51
				\$ 167,521.65	
			\$ 74,786.45		\$ 75,384.74
		\$ 33,386.81		\$ 33,653.90	
	\$ 14,904.83		\$ 15,024.06		\$ 15,144.26
\$ 6,653.94		\$ 6,707.17		\$ 6,760.83	
	\$ 2,994.27		\$ 3,018.23		\$ 3,042.37
		\$ 1,347.42		\$ 1,358.20	
			\$ 606.34		\$ 611.19
				\$ 272.85	
					\$ 122.78

<sup>116</sup> Para mayor detalle de la metodología empleada, consultar el apartado 2.2.3.3 de esta tesis, específicamente el ejemplo de Valuación de Opciones Americanas.

Teniendo la forma en que evoluciona el valor del activo subyacente a través de la multiplicación de las constantes  $u$  y  $d$  (up y down), se calcula el valor que tomará la opción al vencimiento del proyecto (valor intrínseco) y al igual que en la valuación de Opciones Financieras, se utiliza lo anterior para conocer el valor de la Opción.

El valor intrínseco será:

$$\text{Valor Intrínseco} = \max (FFExpansión_T - \text{CostoExpansión}; 0);$$

Donde:

$FFExpansión_T$  : Es el valor presente neto de los Flujos futuros que se obtendrían por la expansión de un porcentaje ( $K$ ), calculado en el momento en que expira la opción ( $T$ ):

$$FFExpansión_T = K (VPN_T)$$

$\text{CostoExpansión}$  : Es la inversión que debe realizarse para ampliar el proyecto.

Por lo tanto, para el proyecto de expansión de la CNLV, al vencimiento del proyecto ( $T=9$ años):

- Si se presenta un escenario favorable, marcado por un incremento en el VPN:

$$\begin{aligned} \text{Valor Intrínseco}_u &= \max [K (VPN_u) - \text{CostoExpansión}; 0] = \max[0.50 (375,248.51) - 4,390; 0] \\ V_u &= \max[183,234.25; 0] = \$183,234.25 \end{aligned}$$

- En el escenario desfavorable debido a un incremento en el VPN, el valor intrínseco sería:

$$\begin{aligned} \text{Valor Intrínseco}_d &= \max [K (VPN_d) - \text{CostoExpansión}; 0] = \max[0.50 (75,384.74) - 4,390; 0] \\ V_d &= \max[33,302.37; 0] = \$33,302.37 \end{aligned}$$

Al tratarse la Opción de Expansión como una analogía de una Opción de Compra Americana, el proyecto podrá concretarse en cualquier periodo, teniendo un valor denominado resultado de ejercicio. El valor del Resultado por ejercicio en cada periodo ( $T$ ) será:

$$\text{Resultado de Ejercicio en } T = K (VPN_T) - \text{Costo de Expansión}$$

**Figura 3.32 Árbol Binomial del Resultado por Ejercicio**

Resultado por ejercicio (VAN Expansión)					
					\$ 183,234.25
			\$ 79,370.83		
		\$ 33,003.23		\$ 33,302.37	
	\$ 12,303.40		\$ 12,436.95		
	\$ 3,062.41	\$ 3,122.03		\$ 3,182.13	
\$ -		\$ -	\$ -	\$ -	
	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
			\$ -	\$ -	\$ -
				\$ -	\$ -
					\$ -

Sin embargo también existe la posibilidad de seguir con la opción de expansión periodo a periodo, en este caso se tendrá un valor que representa mantener a la opción viva:

- El mantener la opción viva, dependerá como ya se ha mencionado de la tasa libre de riesgo ( $r$ ) y de la probabilidad neutral al riesgo ( $q$ ) de que el VPN incremente o disminuya :

$$\text{Valor de la Opción} = \frac{V_u q + V_d (1 - q)}{(1 + r)^{\Delta t}}$$

Por lo tanto, el mantener la opción viva en la CNLV, tiene un valor de:

$$\frac{V_u q + V_d (1 - q)}{(1 + r)^{\Delta t}} = \frac{183,234.25(0.374317915) + 33,302.37(0.625682085)}{(1 + 0.065)^{9/5}} = \$79,841.29$$

Su evolución es:

**Figura 3.33 Árbol Binomial de Mantener Viva la Opción**

Valor de la Opción "Viva"				
				\$ 183,234.25
			\$ 79,841.29	
		\$ 33,893.73		\$ 33,302.37
	\$ 14,069.05		\$ 12,907.41	
	\$ 5,729.11	\$ 4,907.80		\$ 3,182.13
\$ 2,295.05		\$ 1,838.75	\$ 1,063.48	
	\$ 680.87	\$ 355.42		\$ -
		\$ 118.78	\$ -	\$ -
			\$ -	\$ -
			\$ -	\$ -
				\$ -

Por último la inducción hacia atrás consistirá en calcular los valores de los nodos anteriores, eligiendo el mayor valor entre el resultado de ejercicio y el valor de mantener la opción viva:

$$V_t = \max(\text{ejercer}; \text{mantener})$$

$$V_t = \max(\text{valor intrínseco}, \frac{v_{t+1}^u q + v_{t+1}^d (1 - q)}{(1 + r)^{\Delta t}})$$

El resultado, será el Árbol Binomial de la propuesta de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde y a través de la construcción de éste y la interpretación de viabilidad de la Opción que tiene la Comisión Federal de Electricidad, se da por concluida esta tesis.

Figura 3.34 Árbol Binomial de la Propuesta de Expansión de la CNLV<sup>117</sup>

Propuesta de Expansión CNLV						
Tiempo al vencimiento (años)	Valor del Activo			Precio de Ejercicio	Tasa Libre de Riesgo	Porcentaje de Expansión
Inicial	factor alza	factor baja				
9	\$ 6,653.94	2.24	0.450	\$ 4,390.00	6.50%	50.00%
Resultados						
q	1-q	c				
0.374317915	0.625682085	\$ 2,295.05				
paso n°	0	1	2	3	4	5
t (años)	0	1 4/5	3 3/5	5 2/5	7 1/5	9
					\$ 167,521.65	\$ 375,248.51
				\$ 74,786.45	\$ 79,841.29	\$ 183,234.25
			\$ 33,386.81	\$ 33,893.73	\$ 33,653.90	\$ 75,384.74
		\$ 14,904.83	\$ 14,069.05	\$ 15,024.06	\$ 12,907.41	\$ 33,302.37
\$ 6,653.94	\$ 5,729.11	\$ 6,707.17	\$ 4,907.80	\$ 6,760.83	\$ 15,144.26	\$ 3,182.13
\$ 2,295.05	\$ 2,994.27	\$ 1,838.75	\$ 3,018.23	\$ 1,063.48	\$ 3,042.37	\$ -
	\$ 680.87	\$ 1,347.42	\$ 355.42	\$ 1,358.20	\$ -	\$ -
		\$ 118.78	\$ 606.34	\$ -	\$ 611.19	\$ -
			\$ -	\$ 272.85	\$ -	\$ -
				\$ -	\$ 122.78	\$ -
					\$ -	\$ -

El valor en verde (c) de 2,295.05 millones de dólares representa el valor de la opción de expansión con un tercer reactor nuclear. Esta opción representa para la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el **derecho, pero no la obligación, de tomar la acción de expandirse en un 50% a un costo de \$4,390 millones de dólares por un periodo de 9 años**. Y si expresamos la esencia de opciones reales como se explicó en la primera página del capítulo 2 de esta tesis, tenemos que el valor estratégico de la empresa Laguna Verde desde que opera con ambos reactores, al decidirse expandir, está determinado por la representación de un Presente Neto Extendido:

$$VPN_{\text{extendido}} = VPN + \text{Valor de las Opciones Reales}$$

$$VPN_{\text{extendido}} = 6,653.94 + 2,295.05 = \$ 8,948.99 \text{ millones de dólares}$$

<sup>117</sup> Usando el aplicativo del libro de Roberto D. Bacchini, Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, Omicron System, 2006.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aplicando la metodología de Opciones Reales, específicamente el Modelo Binomial, se ha determinado un valor de la Opción de \$2, 295.05 millones de dólares lo que reafirma que **sí existe viabilidad** en los planes estratégicos de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) a través de la implementación de un tercer reactor por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

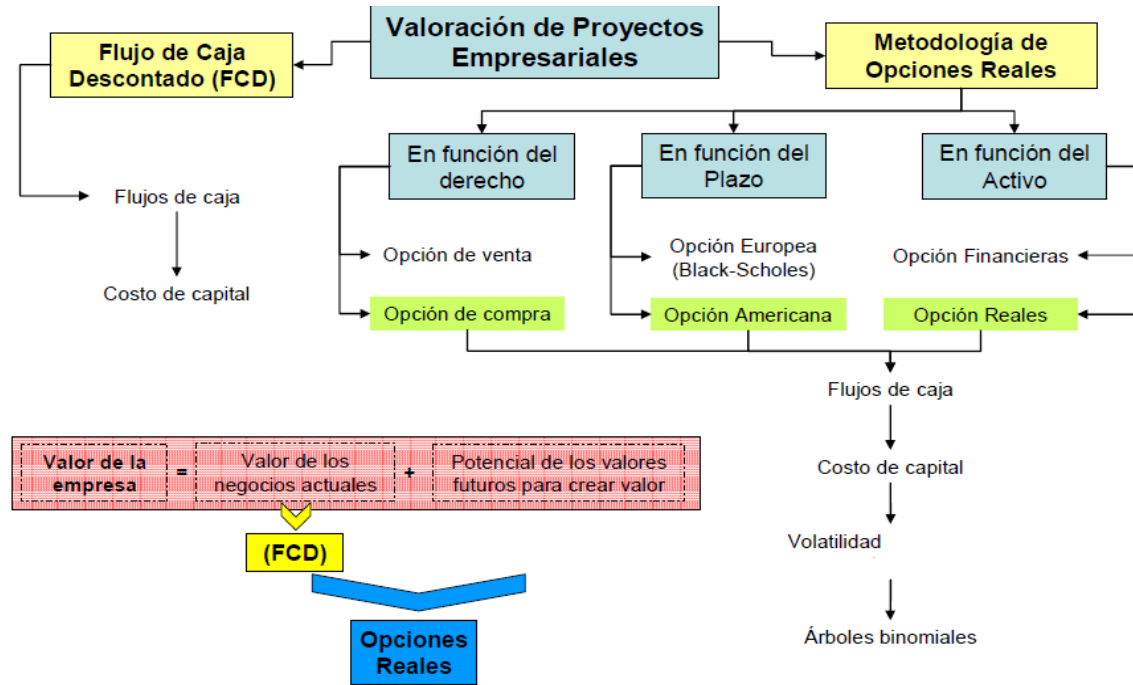
De haber obtenido un valor negativo para la Opción Real, la viabilidad del proyecto no solo sería menor, sino que podría señalar la total inviabilidad del proyecto. Sin embargo el valor de la opción ha incrementado el valor estratégico de la misma Planta Nucleoeléctrica, pasando de tener un Valor Presente Neto (VPN) tradicional de \$6,653.94 millones de dólares, a un Valor Presente Neto (VPN) extendido de \$ 8,948.99 millones de dólares. Esto es debido a que, aunque un VPN evaluado de la forma tradicional es un método que toma en consideración el valor del dinero en el tiempo, y permite evaluar el efecto concreto de muchas variables en los rendimientos y comportamientos futuros partiendo de los flujos de efectivo generados por la operación, la valoración no incluye aspectos tan importantes para una organización como lo es la estrategia de la compañía, la flexibilidad que puede tener un directivo al cambiar el curso de un proyecto en marcha, el considerar que la inversión no es irreversible, poder tomar en cuenta el panorama del proyecto en otro momento bajo otras circunstancias, y la incertidumbre debida a movimientos económicos y propios del negocio que al no ser considerada, supone que no existirá variación alguna en el valor de los activos futuros partiendo de una volatilidad igual a cero. Mientras que en la metodología de Opciones Reales, a través de un VPN extendido se le da un valor a la volatilidad definida con las constantes  $u$  y  $d$  que marcan los incrementos y decrementos probables en el valor del activo, este valor genera flexibilidad al presentar en cada periodo escenarios que muestran la viabilidad proyecto con la opción de ejercer, es decir cancelar el proyecto recuperando así parte de la inversión, o el hecho de evitar pérdidas y mantener viva la opción por más periodos e incrementar el valor estratégico de la empresa. Con esta flexibilidad, puede decirse entonces que se da libertad gerencial para tomar decisiones asertivas futuras y la volatilidad genera un aumento positivo en el valor del VPN.

Resaltando la flexibilidad de la metodología de Opciones Reales en el caso del proyecto de expansión de la CNLV, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con la opción en dos ocasiones de poder cancelar el proyecto, una definida a los 17 meses (1.4166 años) con una pérdida de 13 millones de dólares de los 4,390 que invertiría en total, y la otra a los 27 meses (2.25 años), teniendo como alternativa la venta internacional del equipo para la nueva unidad nuclear que haya adquirido antes de este tiempo, recuperando así cualquier inversión previa. Ante esto gráficamente puede observarse en el árbol binomial que en ambos periodos que involucra la toma de decisión de la CFE, el valor de mantener viva la opción y seguir invirtiendo en el proyecto supera al precio de ejercicio que marcaría la cancelación total de una nueva unidad en Veracruz. Por lo que **la recomendación es llevar a cabo la expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde a través de la adquisición de un tercer reactor nuclear durante los 9 años que dura el proyecto.**



De forma concreta, una síntesis del enfoque aplicado en el proyecto de expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) dado en esta tesis para el Valor de la planta, aplicando el desarrollo de un modelo de valoración a través de una Opción real de Compra Americana, comparado con el uso de flujos de efectivo (flujos de caja) descontados en el tiempo (FCD), se puede representar en el siguiente esquema<sup>118</sup>:

**Figura 3.35 Valoración Potencial de los Activos Futuros en los Proyectos**



Es evidente que la metodología de Opciones Reales, brinda la posibilidad de cuantificar el potencial de los valores futuros, incrementando así el valor de la empresa. Para la CNLV el valor potencial de un tercer reactor nuclear es de \$2, 295.05 millones de dólares, cifra que incrementa el valor de la nucleoelectricidad en México. Además gracias al grafismo del modelo binomial, Opciones Reales brinda un panorama basado en escenarios que permite visualizar de manera periódica la evolución del proyecto futuro para tomar acciones asertivas en el presente y de manera continua, razones de vital importancia para Comisión Federal de Electricidad (CFE) no solo con el proyecto de expansión de una unidad en Veracruz como se ha demostrado en esta tesis, sino también para el análisis de los siguientes reactores que tiene contemplados para años posteriores.

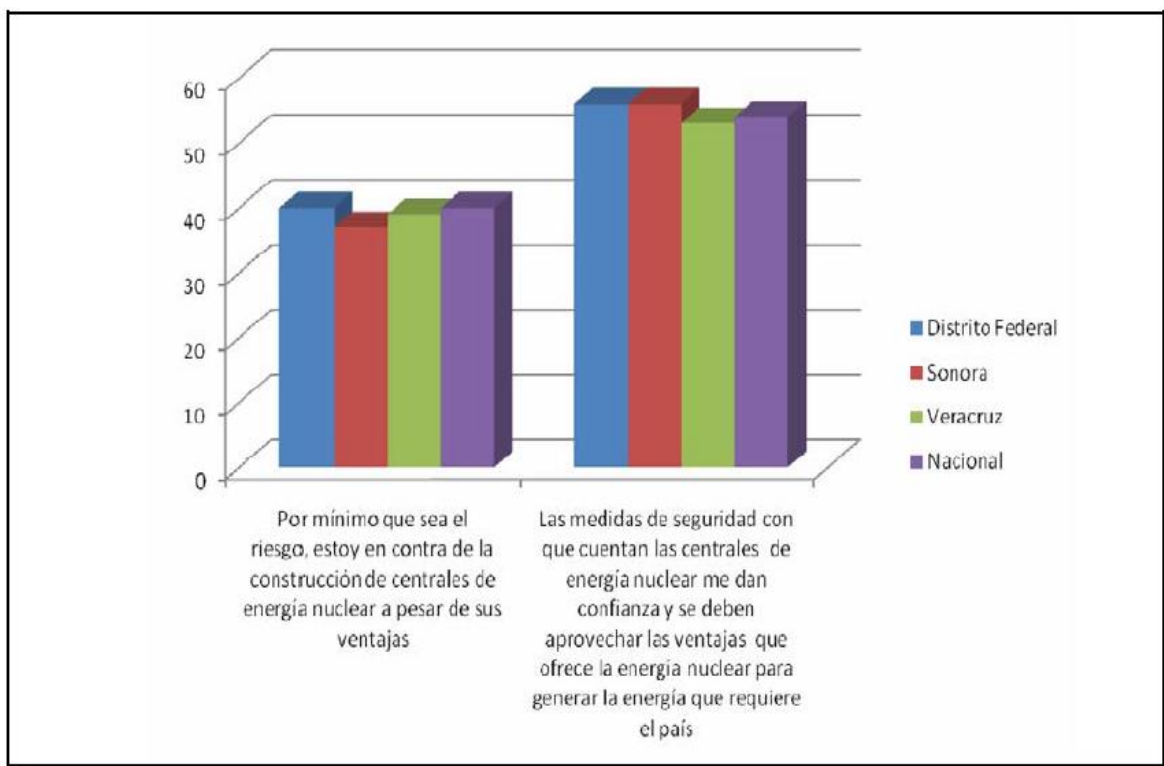
Una vez que se ha concluido que existe viabilidad económica para un tercer reactor en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, para dar por concluida esta tesis se mencionarán algunos aspectos que se recomiendan considerar tanto al lector, como a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el fortalecimiento y unificación de la nucleoelectricidad en el país.

<sup>118</sup> Ricardo García Molina, Opciones Reales como Herramienta para las Decisiones Estratégicas en Colombia.

- Para el lector, que como sociedad tiene el derecho a la información sobre los proyectos nacionales, debe saber que:

En una encuesta realizada en el 2008 por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la población entrevistada está más a favor de que se deben aprovechar las ventajas que ofrece la energía nuclear para generar la demanda de electricidad que se requiere, que en contra de la construcción de centrales nucleoelectricas<sup>119</sup>:

**Figura 3.36 Opinión sobre la Construcción de Centrales Nucleares en base a sus Ventajas y Riesgo**



Dentro de las respuestas a esta encuesta, entre las razones que esgrime la población en desacuerdo, destacan por que es peligroso (10%), porque hay riesgo radiactivo (7%) y porque genera contaminación. Ante esto se sabe que:

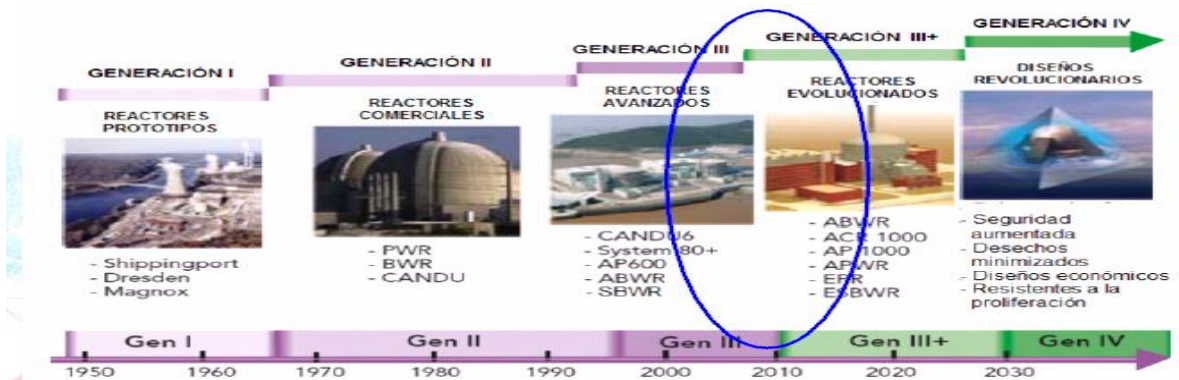
<sup>119</sup> Rafael Fernández de la Garza y otros, La Nucleoelectricidad un Oportunidad para México, La Academia de Ingeniería de México, 2009.

- ✓ Para que ocurra una explosión atómica, el artefacto explosivo requiere de material fisionable (uranio 235 o plutonio 238) con pureza superior al 95% y en un reactor nuclear el combustible apenas contiene el 3.56% en promedio de material fisionable.  
También existe una defensa a profundidad que consta de un conjunto de barreras o protección y por último, el reactor cuenta con varios sistemas de emergencia (sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo del reactor, sistema de reserva de control de líquido, etc) todo para asegurar al medio y a la población ante un accidente.
- ✓ Las unidades Nucleoeléctricas son resguardadas mediante sistemas avanzados de Seguridad Física, centrados en evitar el mal uso de materiales nucleares u otros materiales radiactivos con el objetivo de causar daño intencional. Por otra parte de un conjunto de acciones realizadas por México en la Comunidad Internacional, y en la búsqueda de mitigar las armas nucleares en el mundo, México ha suscrito los acuerdos y tratados para la No Proliferación.
- ✓ Como resultados de los estudios probabilísticos realizados en la CNLV, se deduce que la probabilidad de falla de los sistemas y de seguridad, es mínima. Sin embargo, como un criterio adicional para proporcionar mayor confianza y cumplir con los requerimientos reguladores que permiten obtener la licencia de operación, se hizo un Plan de Emergencia Radiológica Externo (PERE) que contiene los procedimientos a seguir frente a situaciones de emergencia para brindar la seguridad necesaria a la población que habita los 16 km alrededor de la planta, que de acuerdo a regulaciones y estudios internacionales es la que estaría en riesgo de ser afectada por una contingencia.
- ✓ La CNLV desde 1979 y hasta la fecha establece un informe ambiental, que implica aproximadamente 5, 000 análisis al año de todo tipo de muestras (aire, suelo, frutas, leche, carnes, pescados, etc) que describen las características del medio que rodea a la Central. Los resultados obtenidos hasta 1988 (antes de la carga de combustible de la unidad 1) son la base de datos contra la que se comparan los resultados actuales, dichas comparaciones demuestran que a la fecha el impacto ambiental es tan pequeño que estadísticamente no puede distinguirse de la variaciones radiológicas naturales establecidas en la etapa preoperacional, y que no han verificado fenómenos de acumulación o bioacumulación en ningún nivel orgánico monitoreado. Además desde 1990 cuenta con un vivero forestal de especies nativas y en peligro de extinción, donde se han producido más de 95, 000 plantas<sup>120</sup>.
- ✓ Una unidad nucleoelectrica no emite CO<sub>2</sub> ni contaminantes, durante su etapa de generación de energía, por lo tanto no contribuye con gases de efecto invernadero que produzcan un calentamiento global, ni propicia cambios climáticos o lluvia ácida.

<sup>120</sup> Comisión Federal de Electricidad, Del Fuego a la Energía Nuclear, 2010.

- Para la Comisión Federal de Electricidad, que como Organismo es el encargado de garantizar el abastecimiento y distribución de electricidad, debe realizar estudios sobre:
  - Formación de Recursos Humanos y Desarrollo Tecnológico<sup>121</sup>: Informar a las principales instituciones de educación superior sobre la importancia de la energía nuclear para la economía nacional y para el desarrollo tecnológico nacional. Desarrollar acciones con CONACYT, Cámaras e instituciones internacionales. La construcción de una central nucleoelectrónica requiere de los más altos estándares de calidad, tanto en los materiales y componentes utilizados, como en los procesos constructivos. De ahí la importancia de fortalecer la capacidad nacional en estos aspectos. Al respecto, es de particular importancia la participación activa de las Instituciones de Educación Superior Veracruzanas, a fin de diseminar los efectos favorables de este proyecto.
  - Financiamiento y Modificación de la Legislación Nuclear: En México la CFE al final de cuentas paga los costos y asume los riesgos en las decisiones de electricidad, sin embargo en el fondo los costos de cualquier garantía implícita otorgada recaen directamente sobre las finanzas públicas. Por lo tanto, un elemento básico de la estrategia financiera debe ser el diseño de compromisos y fórmulas que permitan asegurar los ingresos provenientes de la generación nuclear. Ante esto la Comisión Federal de Electricidad debe buscar la manera de incentivar el financiamiento privado, compartiendo algunos de los riesgos y modernizando los esquemas regulatorios.
  - Opciones de Reactores Nucleares<sup>122</sup>: Dar seguimiento al desarrollo de la energía nuclear en el mundo y estudiar cuáles son las mejores opciones de reactores a construir en México al corto y mediano plazo. Actualmente, los reactores de tercera generación representan las mejores opciones, 4 a 5 años de construcción:

**Figura 3.37 Desarrollo de la Energía Nuclear (Generación de Reactores)**



- Divulgación y Capacitación a la Sociedad: Brindar información a nivel nacional y específicamente a los pobladores del estado de Veracruz sobre la seguridad de la energía nuclear, sus beneficios y retos.

<sup>121</sup> Rafael Fernández de la Garza y otros, La Nucleoelectricidad un Oportunidad para México, La Academia de Ingeniería de México, 2009

<sup>122</sup> Juan Luis Francois Lacouture, Presentación del Coloquio de Especialidades, Prospectiva de la Energía Nuclear, 2009.

## APORTE DE LA INVESTIGACIÓN

- Estimación de los Flujos de Efectivo históricos de la CNLV desde 1995 hasta el 2008, a través de los ingresos y egresos calculados en función de los datos conocidos y presentados en esta tesis (volumen de energía neta producida anualmente, de datos económicos y técnicos conocidos). Es importante destacar que no existe registro de estos flujos abiertos a todo público, debido a esto se han presentado las fórmulas en que se basaron las estimaciones, para que en un futuro se puedan hacer cálculos actuales y continuos, cada vez que se publiquen nuevos datos de la Nucleoeléctrica Mexicana por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Obtención del Valor Presente Neto de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, a partir del cálculo de sus Flujos de Efectivo Futuros, generados en base a un suavizado exponencial simple, a través de la aplicación de pronósticos.
- Cuantificación de la volatilidad del activo de la CNLV, que permite dar valor y flexibilidad al proyecto de expansión de la CNLV.
- Generación de un Árbol Binomial, que permite observar de manera gráfica la evolución de viabilidad en la implementación un tercer reactor en Laguna Verde, presentando escenarios que le den a la Comisión Federal de Electricidad periodo a periodo un panorama con opciones para tomar decisiones asertivas, que le brinden la posibilidad de recuperar parte de sus activos o evitar pérdidas en momentos determinados.
- Determinación de la Opción Real de Expansión de la CNLV, que representa el valor potencial de los valores futuros, que se originarían con la operación de un tercer reactor en Veracruz. Esta opción permite visualizar de manera cuantificable el incremento de valor que tendría la CFE como empresa con la realización de su expansión.

## OPORTUNIDADES FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Modelación de las demás Opciones de Expansión de la CFE en el área nuclear, contempladas en su programa integral de seis reactores para el año 2024.
- Análisis de los reactores de tercera y cuarta generación, para determinar cuál es el más adecuado para ser implementado en México.
- Detección de las variables críticas que han originado perturbaciones en los reactores nucleares en el mundo, para posteriormente simularlas con escenarios que den pauta a la prevención de accidentes en Laguna Verde.

## BIBLIOGRAFÍA

### REFERENCIAS

1. Aching Guzmán César, Matemáticas Financieras para la toma de decisiones empresariales, 2006, edición electrónica gratuita, texto completo en [www.eumed.net/libros/2006b/cag3/](http://www.eumed.net/libros/2006b/cag3/)
2. Bacchinni Roberto, Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, Omicron System, 2006.
3. Bacchini, Roberto, Míguez, D., García Fronti, Ingeniería Financiera, Futuros y Opciones, Omicron System, 2004.
4. Brennan & Schwartz, Evaluating Natural Resource Investments, Journal of Business, 1985.
5. Carbajal Lujano José Angel, Opciones Reales, estrategia empresarial en las decisiones de inversión, 2006.
6. CENAPRED, Manual del participante, Introducción a la Central Nucleolétrica Laguna Verde, 2009.
7. Central Nuclear de Trillo ([kalipedia.com](http://kalipedia.com)).
8. Chávez Ocaña Jorge Enrique, Métodos Alternativos de Evaluación de Proyectos, Universidad Francisco Marroquín, Facultad de Ciencias Económicas, 2004.
9. Chichil Yolanda, Como reducir la incertidumbre en las finanzas, UAM, 2000.
10. Comisión Federal de Electricidad, Del Fuego a la Energía Nuclear, 2010.
11. Copeland, Tom y Antikarov, Vladimir, Real Options, A practitioner's guide, Texere, New York, 2001.
12. Edleson, Michael, Real Options: Valuing Managerial Flexibility, Harvard Business School, 1994.
13. Fernández de la Garza Rafael y otros, La Nucleoelectricidad un Oportunidad para México, La Academia de Ingeniería de México, 2009.
14. Fernández Seijo Lucía, Instrumentos, Inversiones, Riesgo y Financiamiento, 2008.
15. Francois Lacouture Juan Luis. Apuntes de Fundamentos de Energía Nuclear, Tecnología de Reactores, 2011.
16. Francois Lacouture Juan Luis, Presentación del Coloquio de Especialidades, Prospectiva de la Energía Nuclear, 2009.
17. Francois Lacouture Juan Luis, Presentación del libro, La Nucleoelectricidad un Oportunidad para México, La Academia de Ingeniería de México, 2009.
18. Glasstone Samuel, Ingeniería de Reactores Nucleares, Editorial Reverté, 2005.
19. Hull, J.C., Options, Futures, and other Derivatives, Prentice-Hall, Toronto, 2000.
20. Kester, W. Carl, Today's options for tomorrow's growth, Harvard Business Review, 1984.
21. Majd & Pindyck, Time to Build, Option Value, and Investment Decisions, Journal of Financial Economics, 1987.

22. Mascareñas y Lamothe, Opciones Reales y Valoración de Activos, Prentice Hall, 2005.
23. Merton, Robert, Theory of Rational Option Pricing, Bell Journal of Economics and Management Science, 1973.
24. Mesa Oramas Jesús, Métodos para la Evaluación de Proyectos, curso del área Gestión de Proyectos.
25. Opción de Cambio: Margrabe ,The Value of an Option to Exchange One Asset for Another, Journal of Finance , 1978.
26. Oliveros Miguel, Administración de la Producción y las Operaciones I, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad de los Andes.
27. Ortíz Edgar, Finanzas y Productos Derivados, Contratos Adelantados, Futuros y Opciones, Swap. UNAM, en proceso.
28. Plan Nuclear, Presentación SENER, Junio del 2010.
29. Presentación del XIV Convención Iberoamericana de Excelencia, FUNDIBEQ, Septiembre/2010.
30. Presentación SENER, Propuesta de escenarios, Junio 2010
31. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE 2010-2024).
32. Programa Win QSB (Quantitative System Business).
33. Publicaciones de CFE, Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, México, 1999.
34. Publicación, The Cost of New Generating Capacity in Perspective, del Nuclear Energy Institute (NEI por sus siglas en inglés) de agosto del 2008
35. PYMES FUTURO, Gerencia, Finanzas, Proyectos, Asesoría y Consultoría para pymes.
36. Trabajos de Leland (1985) o Boyle y Vorst (1992).
37. Trigeorgis, Lenos , Real Options, Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation. Cambridge, 1996.
38. Urbina Beca, Evaluación de Proyectos, Mc Graw Hill, México, 1999.
39. <http://www.ai.org.mx>
40. <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/publicaciones/Paginas/Publicaciones.aspx>
41. <http://www.nyc.gov/html/omb/home.html> y [www.cbo.gov](http://www.cbo.gov)



## ANEXOS

### Publicaciones Relacionadas con la Opción de Expansión de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV)

CNNEXPANSION.com

Ingresar tu búsqueda aquí Buscar

Inicio
Empresas
Economía
Mercados
Finanzas Personales
Emprendedores
Carrera
Tecnología
Life & Style
Especiales
Rankings
Actualidad n°

Publicado: Lunes, 11 de enero de 2010 a las 18:31 Enviar Imprimir Compartir Texto Y! Buzz Jueves 6 de enero de 2011 00:54:44 | México DF

## La nueva Laguna Verde

Firmas internacionales de energía quieren invertir en otra planta nucleoeléctrica para México; todo depende de la decisión final de la Comisión Federal de Electricidad.

### Obras



Laguna Verde (Veracruz, 1990) ha sido uno de los proyectos de infraestructura más polémicos de la historia. (Foto: Especial)

Por: Ana Lydia Valdés

Las empresas globales productoras de energía esperan a que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se decida a construir otra nucleoeléctrica en México.

El negocio traería cuantiosas inversiones: sólo Laguna Verde, con una capacidad instalada de 1,364.88 MW, necesitó 3,500 millones de dólares (mdd).

En el mundo ya hay interesados en un proyecto de esta magnitud, como Gas Natural-Unión Fenosa, Iberdrola, Mitsubishi, Mitsui, Intergen, Areva y AES, coinciden diversos especialistas.

ARTÍCULOS RELACIONADOS

**CFE planea invertir 5,000 mdd en 10 años**

La Comisión Federal de Electricidad contempla fortalecer la infraestructura eléctrica en el país.

**Proyectos mexicanos hacen pasarela en NY**

Funcionarios federales presentan los proyectos de infraestructura 2010 y 2011 ante inversionistas.

**Licitación de fibra óptica, insuficiente**

La licitación de la red de CFE abre una mayor competencia, pero no mayor cobertura: expertos.

**CFE alista 5,000 mdp para red eléctrica**

Elías Ayulo señaló que el monto se destinará a la red de distribución del centro del país.

**Más barato**

Energía	Centavos Kw/h
Nuclear	2
Ciclos combinados (gas natural)	4
Vientos y energía solar	8-10

FUENTES: CFE Y BARRIS & MICHAEL

Pese a que los privados no están facultados para producir electricidad para venderla a la población, las empresas podrían participar mediante proyectos llave en mano, asegura Jaime de la Rosa, director general de la Asociación Mexicana de Energía (AME).

Gabriel Quadri de la Torre, director general de México y Centroamérica de EcoSecurities, afirma que la nucleoeléctrica de Laguna Verde fue el primer paso.

De la Rosa apoya la idea, pues desde su punto de vista, "en un futuro, el gobierno podría considerar la construcción de otra central nuclear, porque es una energía limpia y segura". A esto hay que agregar su bajo costo de operación y que es una alternativa ante el agotamiento de los hidrocarburos.

**MERCADOS** en CNNEXPANSION.com

El canal de consulta que concentra todos los indicadores relevantes de los principales mercados bursátiles en el mundo.

**Principales Noticias**

- Frisco debuta en Bolsa y \$ilm tendrá 79%
- Motorola presenta su nueva 'tablet' Xoom
- Acreedores llegan a acuerdo con Mexicana
- La sirena de Starbucks se actualiza a los 40 años
- Corrupción, un mal que aqueja a México

**LICITACIONES**

Obras

**AGENDA**

Obras

113

Noticias ▾ Culiacán ▾ Mazatlán ▾ El Norte ▾ El Sur ▾ Gente ▾ Deportes ▾ Expresión ▾ Oportun

Defensor del lector | Multimedia | Blogs | Opina | Guía | Chat | Servicios | Edición Impres | Haz Noroeste.com tu página de inicio

## Descartan riesgos en la planta Laguna Verde

Funcionarios públicos recorren instalación nuclear en Veracruz para revisar sistemas de seguridad

EFE/UNIV

17-03-2011

VERACRUZ (EFE/UNIV).\_Autoridades mexicanas recorrieron ayer las instalaciones de la planta nucleoelectrica Laguna Verde, única en su tipo en el País, y defendieron que es completamente segura, tras los temores generados por la fuga de radiación en una planta nuclear en Japón.

"Después de hacer un recorrido exhaustivo por toda la planta nucleoelectrica Laguna Verde podemos afirmar que es segura", dijo tras el recorrido en su cuenta de Twitter el Gobernador de Veracruz, Javier Duarte.

El Gobernador acompañó al Secretario de Energía, José Antonio Meade, en su visita para inspeccionar las instalaciones que albergan dos reactores nucleares y revisar el Plan de Emergencia Radiológica Externo.

"Tenemos todas las garantías del Gobierno federal, de la Secretaría de Energía y de la Comisión Federal de Electricidad de que Laguna Verde se encuentra en óptimas condiciones", reiteró el Mandatario a medios locales.

Laguna Verde se encuentra ubicada sobre la costa del Golfo de México, en el kilómetro 42.5 de la carretera federal Ciudad Cardel-Nautla, en la localidad denominada Punta Limón del municipio de Alto Lucero.

a+ a+ a+

Coméntala Imprimir Compartir

Favoritos Calificala Envía a un amigo



La situación de emergencia en Japón desató una serie de reacciones en más de una veintena de gobiernos de países que actualmente tienen plantas nucleares en operación o en desarrollo.

"Tenemos una planta nucleoelectrica que está con todas y cada una de las especificaciones de seguridad, que permiten que la sociedad veracruzana pueda estar tranquila", insistió Duarte.

Ambos funcionarios aseguraron que Laguna Verde tiene todas las condiciones de seguridad exigidas por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias y no existe ningún riesgo para la población.

En este recorrido también participaron miembros de dicha Comisión, así como del Instituto de Investigaciones Nucleares de México y los directores generales de la Comisión Federal de Electricidad, Alfredo Elías Ayub y Antonio Vivanco.

Por su parte, el presidente de la Comisión Especial de Protección Civil de la Cámara de Diputados, Fernando Morales Martínez, explicó que el recorrido tuvo como principal objetivo evitar riesgos como los ocurridos en Japón.

El parlamentario consideró que lo que ha pasado en el país asiático debe encender las alarmas en México para evitar situaciones similares ante un terremoto.