

Análisis de mercados de electricidad

Alfredo Trespalacios Carrasquilla

Javier Orlando Pantoja Robayo

Óscar Alonso Fernández Taborda



Trespalcios Carrasquilla, Alfredo

Análisis de mercados de electricidad / Alfredo Trespalcios Carrasquilla, Javier Orlando Pantoja Robayo, Óscar Alonso Fernández Taborda. -- Medellín: Editorial EAFIT, 2017.

276 p.; 24 cm. -- (Colección Académica)

ISBN 978-958-720-467-4

1. Sector eléctrico. 2. Sector eléctrico – Colombia. I. Pantoja Robayo, Javier Orlando. II. Fernández Taborda, Óscar Alonso. III. Trespalcios Carrasquilla, Alfredo. IV. Tít. V. Serie

333.7932 cd 23 ed.

T798

Universidad EAFIT- Centro Cultural Biblioteca Luis Echavarría Villegas

Análisis de mercados de electricidad

Primera edición: noviembre de 2017

© Alfredo Trespalcios Carrasquilla, Javier Orlando Pantoja Robayo y Óscar Alonso Fernández Taborda.

© Editorial EAFIT

Carrera 49 No. 7 sur - 50

Tel.: 261 95 23, Medellín

<http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial>

Correo electrónico: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 978-958-720-467-4

Editora: Carmiña Cadavid Cano

Diseño: Alina Giraldo Yepes

Diagramación: Artes y Letras S.A.S.

Imagen de carátula: 20576279, ©shutterstock.com

Universidad EAFIT | Vigilada Mineducación Reconocimiento como Universidad: Decreto Número 759, del 6 de mayo de 1971, de la Presidencia de la República de Colombia. Reconocimiento personería jurídica: Número 75, del 28 de junio de 1960, expedida por la Gobernación de Antioquia. Acreditada institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional, mediante Resolución 1680 del 16 de marzo de 2010.

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de la editorial.

Editado en Medellín, Colombia

Alfredo

*A David, Santiago, Marta, Diego, Odín.
Bárbara, Samuel, Ofelia, Gabriel.
Samuel, Andrés*

Javier

A Sebas, fuente de mi inspiración

Óscar

*A mis dos hijos que ganan casta
como la buena energía*

Contenido

Agradecimientos	19
Prólogo	21
Energía	25
Algunas nociones sobre electricidad	35
Generación de electricidad.....	37
Cadena de suministro	40
Unidades de medida	41
Precios de electricidad a nivel mundial.....	42
Mercado eléctrico en Colombia.....	45
Interacción económica	51
Diferencia entre electricidad y otros activos transables	51
Función de oferta.....	53
Función de demanda.....	53
Competencia perfecta	54
El monopolio.....	55
Modelos de administración de mercados	59
El modelo estatista.....	59
El modelo competitivo.....	61
Elementos de diseño para mercados competitivos	63
La crisis de California	66
El poder de mercado	71

Modelación de mercados de electricidad.....	77
Tendencias de modelamiento de mercados eléctricos.....	80
La demanda por electricidad.....	83
Determinantes de la demanda de electricidad.....	83
Elasticidad de la demanda	84
Formación del precio spot.....	87
Contratos de largo plazo o forward.....	93
Beneficio.....	95
Cobertura.....	99
Negocio de oportunidad	102
Modalidades de contratación.....	105
Riesgo de crédito.....	109
Prima de riesgo de mercado	110
Riesgo de contraparte.....	115
Pérdida esperada.....	119
Proceso de crédito	121
Contratos de futuros	123
Licitaciones para el suministro de energía.....	129
Tipos de subastas	129
Mecanismos de contratación en diferentes mercados.....	131
Pagos por firmeza	133
Cargo por capacidad	134
Los mercados de confiabilidad.....	135
Despacho hidrotérmico	137
Despacho económico y condiciones de red	143
El problema del despacho económico sin red.....	143

Flujo de potencia a través de las líneas de transmisión	146
Despacho económico con restricciones de línea	147
Código para flujo de potencia DC.....	148
Código para DE con restricciones de red	150
Evaluación financiera de proyectos.....	155
Costo nivelado.....	161
Desarrollo algebraico.....	163
Riesgo, rentabilidad exigida y tiempo (κ)	167
Índice climático.....	169
Algunos tópicos asociados al cambio climático.....	177
Elementos del enfoque sectorial	178
Emisiones por quema de combustibles fósiles para generación de electricidad.....	179
Energía solar como generación distribuida	180
Beneficios sociales por la adopción de fuentes renovables.....	182
Riesgo de mercado.....	185
Volatilidad	185
Medidas de ubicación	189
Medidas de dispersión.....	191
El efecto de la correlación.....	197
Cobertura con contratos forward.....	201
Flujo de caja por venta de energía.....	202
Flujo de caja por compra de energía	204
Función para toma de decisiones.....	207
Efecto del VaR.....	213
Opciones financieras	217
Opciones de compra call	218
Opciones de venta put	220

Valoración de opciones.....	223
Estrategias con opciones	225
Administración de riesgo	229
Identificación del riesgo.....	230
Elementos para la cuantificación.....	234
Elecciones para el tratamiento.....	235
Seguimiento y reporte	236
Modelos estocásticos.....	239
Conceptos iniciales	239
Movimiento browniano	243
Integral estocástica.....	245
Lema de Itô.....	246
Proceso de reversión a la media	247
Código para generar trayectorias con reversión a la media.....	252
Modelo de spot de un factor.....	254
Modelo de spot de un factor con saltos.....	257
Modelo de dos factores de Pilipovic	258
Estimación de precio spot para Colombia	258
Precio forward.....	261
Precio forward en tiempo discreto	263
Precio forward para acciones.....	263
Algunos sitios web de interés.....	267
Referencias.....	269
Los autores.....	273

Lista de figuras

Figura 1. Artilugio que transforma energía potencial en cinética	28
Figura 2. Dispositivos que transforman energía potencial en cinética o cinética en potencial.....	29
Figura 3. Fuentes primarias de energía a nivel mundial.....	30
Figura 4. Fuentes primarias de energía a nivel mundial en 1973 y 2015	30
Figura 5. Fuentes primarias de energía en los países OCDE en 1973 y 2016.....	31
Figura 6. Mapa de burbujas por producción de energía a nivel mundial a 2012.....	32
Figura 7. Interacción entre corriente, voltaje y resistencia	36
Figura 8. Esquema básico de un circuito eléctrico.....	36
Figura 9. Cadena de suministro de la electricidad.....	40
Figura 10. Generación hidráulica y térmica en Colombia (MWh). Periodo normal y de escasez.....	48
Figura 11. Demanda de electricidad del MNR por tipo de actividad económica en Colombia.....	49
Figura 12. Transacciones en contratos y bolsa en mercado eléctrico colombiano.....	50
Figura 13. Cruce oferta y demanda	54
Figura 14. Objetivos comunes para la modelación en mercados	79

Figura 15. Número de artículos y revistas anuales sobre mercados de electricidad en Scopus	80
Figura 16. Formación de precio spot.....	89
Figura 17. Formación de precio en cada nodo en un sistema multinodal	90
Figura 18. Sistema de potencia radial y enmallado.....	91
Figura 19. Momentos en la negociación de contratos de largo plazo	95
Figura 20. Esquema de beneficio positivo y negativo para quien tiene posición larga.....	96
Figura 21. Esquema de beneficio positivo y negativo para quien tiene posición corta	98
Figura 22. Beneficio de agente con posición larga	98
Figura 23. Condiciones de contrato forward muy costoso y muy barato.....	104
Figura 24. Esquema de contrato forward en la modalidad PLC	106
Figura 25. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con techo	107
Figura 26. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con piso	108
Figura 27. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con piso y con techo	109
Figura 28. Riesgo de pago de la firma	116
Figura 29. Función de pérdida en cartera y algunos parámetros.....	120
Figura 30. Actividades del proceso de crédito	122

Figura 31. De contrato forward a contrato futuro	123
Figura 32. Anillos de seguridad implementados por la cámara de riesgo de contraparte.....	124
Figura 33. Administración de cuenta de margen en contrato de futuros.....	126
Figura 34. Esquema de rondas en subasta de reloj descendente	131
Figura 35. Regla básica de operación de embalses en sistema hidrotérmico	138
Figura 36. Operación de sistema para escenarios posibles de demanda e hidrológicos.....	142
Figura 37. Esquema general del modelo para la estimación de efecto de red eléctrica sobre los ingresos de un generador de electricidad	144
Figura 38. Esquema de sistema de potencia general.....	145
Figura 39. Modelo Pi de línea de transmisión.....	146
Figura 40. Ilustración de elementos del VPN.....	158
Figura 41. Valor de kappa en función de tasa de interés y años de vida útil para proyectos de inversión.....	167
Figura 42. Histograma de aportes hidrológicos diarios a las plantas del sistema eléctrico colombiano.....	171
Figura 43. SHI	172
Figura 44. Relación de movimientos del SHI y el ONI	173
Figura 45. Correlaciones entre el SHI y el ONI	174
Figura 46. Incorporación de energía solar a un sistema de distribución local	182
Figura 47. LCOE por unidad de generación para energía solar, en función de la generación esperada	182
Figura 48. Volatilidad de precios de energía.....	186

Figura 49. Proceso para estimación de volatilidad.....	187
Figura 50. Estadísticos en distribución de probabilidad.....	196
Figura 51. Forma de VaR y CVaR en simulación Montecarlo	196
Figura 52. Explicación de diagrama xy para dos variables aleatorias con correlación positiva.....	197
Figura 53. Diagrama de dispersión xy para variables aleatorias correlacionadas	199
Figura 54. Función de utilidad y distribución de probabilidad de riqueza y utilidad.....	209
Figura 55. Ubicación de portafolios spot y forward en plano riesgo-recompensa	209
Figura 56. Función de utilidad y de varianza del agente con lambda igual a 1 en función de eta.....	211
Figura 57. Conjunto de curvas eficientes del portafolio para diferentes momentos de negociación (tau).....	211
Figura 58. Tablas de cobertura con contratos forward para mercado eléctrico colombiano.....	212
Figura 59. VaR en función de eta para varios niveles de correlación entre el precio spot y la cantidad de energía.....	214
Figura 60. Regiones para la toma de decisiones que incluyen restricción de tipo $VaR \leq VaR^*$	215
Figura 61. Condiciones de precio spot en las cuales es conveniente ejercer la opción call	219
Figura 62. Pago y utilidad de la opción call al momento del vencimiento para posición larga	220
Figura 63. Condiciones de precio spot en las cuales es conveniente ejercer la opción put	222
Figura 64. Pago y utilidad opción put al momento del vencimiento para posición larga	222

Figura 65. Perfil de utilidad de estrategia bull spread con opciones put.....	226
Figura 66. Perfil de utilidad de estrategia bear spread con opciones call.....	227
Figura 67. Ciclo básico de la administración de riesgos	230
Figura 68. Matriz de riesgos para visualización de efecto y probabilidad.....	235
Figura 69. Probabilidad condicionada	242
Figura 70. Siguiendo los pasos de un movimiento browniano.....	243
Figura 71. Simulación de proceso estocástico con reversión a la media por 3 años.....	247
Figura 72. Simulación de proceso estocástico con reversión a la media por 30 años	249
Figura 73. Simulación de un proceso Ornstein Uhlenbeck con una trayectoria.....	252
Figura 74. Precio de bolsa para Colombia estimado y ocurrido.....	260
Figura 75. Trayectorias e histograma de curva forward para mercados de electricidad.....	262

Lista de tablas

Tabla 1. Producción mundial de electricidad.....	33
Tabla 2. Precios de energía en países OCDE, primer trimestre de 2015.....	43
Tabla 3. Entidades y roles en el mercado eléctrico colombiano.....	46
Tabla 4. Elasticidad de la demanda de energía al precio	86
Tabla 5. Conjunto de ofertas enviadas por los generadores a la bolsa (nombres ficticios).....	88
Tabla 6. Curva de oferta a partir de datos entregados por generadores.....	89
Tabla 7. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot	99
Tabla 8. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot y adiciona cobertura con contrato de largo plazo	100
Tabla 9. Posibles ingresos de GeneroEnergía si mantiene exposición a spot	101
Tabla 10. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot y adiciona cobertura con contrato de largo plazo	102
Tabla 11. Transacciones a realizar para especular con contratos forward	105
Tabla 12. FRP para Colombia.....	113
Tabla 13. Calificación del riesgo de crédito de las compañías.....	118
Tabla 14. Probabilidad acumulada promedio de default en función de calificación crediticia	119

Tabla 15. Manejo de cuenta de margen para posición larga en contrato de futuros.....	127
Tabla 16. Especificación de parámetros para licitaciones de diferentes mercados de electricidad.....	132
Tabla 17. Del flujo de caja del proyecto al del inversionista.....	156
Tabla 18. Flujo de caja del proyecto	156
Tabla 19. Flujo de caja del inversionista	157
Tabla 20. Valores de beta para negocios de energía	160
Tabla 21. Costo nivelado para diferentes tecnologías	168
Tabla 22. Estadísticos descriptivos de promedio de aportes a las plantas del sistema eléctrico colombiano.....	171
Tabla 23. Correlaciones entre el SHI y el ONI.....	174
Tabla 24. Comportamiento típico del índice	175
Tabla 25. Componentes de estrategia bull spread con opciones put.....	225
Tabla 26. Componentes de estrategia bear spread con opciones call.....	227
Tabla 27. Regla para diferenciación estocástica.....	245

Agradecimientos

Los tres autores de este texto queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a Linsi Sánchez Alarcón, quien de forma desinteresada realizó muchas de las figuras de este libro. También a todas aquellas personas que participaron en su construcción, con aportes tan diversos como la recopilación de información, la redacción de algunas líneas, la reestructuración de todo el texto, la revisión y reformulación de ecuaciones, las preguntas incisivas, las palabras de aliento y hasta la estimación de modelos. Entre ellos se destacan el físico Nicolás Fernández; el abogado Santiago Trespalacios; el maestro de tantos economistas, doctor Luis Guillermo Vélez; el doctor en Ingeniería y director-fundador de ECSIM, Diego Gómez; la doctora en Finanzas y fundadora de la Maestría en Finanzas de la Universidad EAFIT, Cecilia Maya; la decana de Economía del Instituto Tecnológico Metropolitano, Yudy Giraldo; el consultor y profesor de muchos ingenieros electricistas, Jaime Alberto Blandón Díaz; el presidente de Derivex, Rodrigo Castellanos; los especialistas en mercados de electricidad, Gisleny García Naranjo, Francisco Javier Bedoya, Carlos Alberto Londoño Tobón, Germán Alberto Caicedo, David Andrés Galeano y Ángela María Mendoza; el director del Clúster de Energía de la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, Jaime Alberto Arenas Plata; el estudiante de la Maestría en Finanzas Juan Pablo Pérez Monsalve; los estadísticos Estefanía Gaviria y Giovanni Soto; el ingeniero financiero y estudiante de Estadística, Jonathan Cano Bedoya; los estudiantes de Economía y Administración de la Universidad EAFIT, Mariana Ortiz Echavarría y Nicolás Londoño Aristizábal; y, finalmente, los econométricos Juan Fernando Rendón García y David Rodríguez Guevara. A todos ellos, en forma y fondo, mil y mil gracias.

En párrafo aparte y para lograr el impacto que merece, agradecemos enormemente a la Editorial EAFIT, quien desde el principio le apostó a este proyecto y nos acompañó en todo lo que se necesita para que el lector reciba un proyecto con toda la calidad que representa este sello. Así mismo a los evaluadores de esta propuesta, que lograron identificar puntos críticos para lograr un mejor contenido en esta edición.

Agradecemos también todos los comentarios y recomendaciones que los lectores de este proyecto nos puedan hacer, conforme adelanten su lectura, para eventuales futuras ediciones; por favor no duden en enviarnos un correo electrónico.

Prólogo

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma: es la idea elemental con la que somos iniciados en la física básica. A esto le haríamos una modificación desde nuestra condición humana: la energía no se crea ni se destruye, solo intentamos aprovecharla. Y es que nuestro planeta, tal cual lo conocemos, es una casi infinita concentración de energía. ¿Conocemos algo que nos brinde una menor impresión de ser fuente de energía que una rígida roca? Siempre acudimos al ejemplo de este objeto –la roca– para significar lo inerte, estático, ausente de cualquier energía; sin embargo, nos sorprendería la cantidad de energía que esta tiene; de un lado, podría aprovecharse químicamente con los medios adecuados, de otro, cuando algún niño, por verla rodar, la arroja por una colina, la roca genera grandes cantidades de energía cinética en el trayecto.

El acceso a la energía constituye un factor esencial para la calidad de vida del ser humano; es tan básico en nuestro tiempo como el acceso al agua potable, al saneamiento o a la alimentación. Sin embargo, cuando se habla de energía se hace con poca claridad y sin una definición precisa, solo la percibimos directamente en nuestra relación más cercana: la electricidad, el gas y la gasolina. La primera nos da el insumo para iluminarnos y para el disfrute de nuestras comodidades tecnológicas, la segunda está en la cocción de los alimentos y el calentamiento del agua y la tercera se asocia con el desplazamiento, ya sea en carro, en moto o en bus, que nos lleva al trabajo o a nuestro hogar.

Mientras el planeta en su acepción física es energía, el mundo, en su matiz humano, es financiero, económico y siempre fijado por valores de cambio y productividad. Por ejemplo, el carpintero de Belén, cuyo nombre partió la historia de la humanidad en dos, según Mateo 25 del 14 al 30, hubo de comparar el juicio final con el balance hecho por un hombre a sus tres ciervos, a quienes después de entregarles 5, 3 y 1 talento, los llamó a cuentas. Constató entonces que los dos primeros habían duplicado sus recursos mientras que el tercero había traído lo mismo con lo que había sido dotado, poniéndolo en su historia como un ejemplo de quien no sería merecedor de las gracias prometidas. He aquí, en la Biblia, un buen

ejemplo de lo que es el mundo, un constante flujo de utilidades, riesgos, pérdidas y aprovechamiento de las capacidades propias y del entorno. No es para nada distante esta situación de la actividad empresarial de nuestros tiempos cuando, al principio del segundo trimestre de cada año, los accionistas de las compañías realizan sus asambleas para identificar cuánto ha quedado de sus buenas obras y cuánta es la recompensa (dividendos) que ellos merecen.

De la conjugación del planeta y el mundo, aspecto físico versus aspecto social, es que nace este libro, que combina, de un lado, los elementos básicos del movimiento de electrones a través de un medio conductor, y, por otro, la interacción de los mercados de energía dentro de un modelo regido por la libertad y la competencia y a la vez reglado por completo y centralmente controlado. Es paradójico en este contexto, que de un bien físico de un planeta finito las empresas pretendan una a una lograr crecimiento económico sostenido incluso por encima del crecimiento de la población; claramente esta situación no se presentará de forma natural y a medida que todos crezcan utilizando los mismos recursos, los retos que atañen a la competencia serán cada vez mayores.

La necesidad de las industrias de lograr utilidades y los niveles de apalancamiento (relación deuda-patrimonio) que tienen para lograrlo, han llevado a que la renta financiera sea mayor que la renta real, las diferencias sociales sean pronunciadas, los mercados globales sean cada vez más volátiles, las probabilidades de quiebra sean más altas y el análisis cuantitativo de los riesgos más necesario. Las inestabilidades sociales, políticas, económicas y financieras vienen acompañadas así mismo, en este empeño de la humanidad por encontrar los fines del crecimiento, de una crisis ambiental que es producto, entre otras cosas, de las emisiones de gases invernadero debido a la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Esta situación exige la adaptación de la estructura de producción de las naciones que incluye la modificación de la canasta energética a favor de fuentes renovables no convencionales, con los cambios técnicos y regulatorios que estas merecen. Si este libro hubiera sido escrito hace diez años posiblemente en su contenido no tendría el capítulo de cambio climático y si lo tuviera, parecería el aporte de un escritor apocalíptico; hoy, los hallazgos empíricos y teóricos en la materia hacen que su aparición en este texto sea pertinente.

A esta altura del prólogo quisiéramos confesar que cumplir el reto de completar las páginas que cubren este libro fue más arduo de lo esperado,

no solo por nuestra formación principal en ramas cuantitativas y por el hecho de llevar unos años en el tema, lo que en ocasiones no permite diferenciar el sentido común del conocimiento adquirido, sino también por la dificultad que implicó dar orden a un sinnúmero de ideas que brotan incesantemente cada que se aborda alguna de las temáticas relacionadas con el objeto de esta libro. Ahora con seguridad valoramos mucho más cada texto de nuestras bibliotecas y sabemos que es muy probable que hayamos cometido errores, por los cuales nos disculpamos desde ahora, declarando que cualquiera de ellos fue cometido sin intención alguna.

Nuestra experiencia en tópicos de mercados de electricidad, que incluye la participación directa en la operación de compra y venta de energía, la evaluación de grandes proyectos de infraestructura, la realización de varias investigaciones publicadas en revistas indexadas a nivel nacional (Colombia) e internacional, la participación en grupos de investigación en Europa y Colombia, y la dirección de proyectos en innovación y desarrollo, nos ha posibilitado descubrir que ni el triple del tiempo que hemos dedicado a estas labores ni diez veces la dedicación que hemos puesto nos entregaría material suficiente para escribir todo lo que se requiere para comprender aquello que motiva el comportamiento de los agentes en los mercados de electricidad, prever las necesidades futuras a la que se enfrenta la humanidad y saber con exactitud cómo el responsable de tomar decisiones deberá actuar ante cada circunstancia. Así, con este libro tan solo queremos aportar con un diferencial para que el lector lo agregue a su integral de conocimiento.

Nuestro interés es presentar un panorama general de los mercados eléctricos y entregar al lector elementos que serán de utilidad en diferentes contextos. Por eso, en algunos de los apartes incluimos casos particulares del mercado de electricidad en Colombia, mercado donde hemos aplicado la mayor parte de nuestros conocimientos tanto en el campo académico como en el práctico, y que por sus características se convierte en un caso de estudio interesante.

Este libro está dirigido a un amplio público. Con el lenguaje sencillo y la generalización de los conceptos pretendemos llegar a aquellos que apenas inician su carrera profesional inmersos en un mercado de electricidad. Así mismo, utilizamos conceptos básicos que harán más fácil el camino para aquellos que arrancan un proyecto de investigación alrededor de estos tópicos; no en vano el libro empieza describiendo el concepto de energía, sigue con algunos elementos de la electricidad y

presenta varios enfoques utilizados para la modelación. De la misma forma, hay capítulos que son de utilidad para quienes ya tienen una experiencia tanto académica como profesional en mercados de electricidad, como es el caso de los capítulos sobre las estrategias de cobertura y los modelos estocásticos, por ejemplo. Además, es nuestra intención que el texto sirva para acompañar cursos de formación de profesionales analistas en proyectos de energía y que acompañe a su dueño durante una buena cantidad de años en su biblioteca para que eventualmente lo ojee con la intención de refinar una idea o exposición.

En atención de lo que se describe en el párrafo anterior, anticipamos que el lector encontrará capítulos con elementos didácticos que hacen fácil la incorporación de conceptos nuevos; sin embargo, a partir del capítulo “Despacho hidrotérmico” el lenguaje se hace un poco más complejo, en la misma línea de los libros técnicos, como los de ingeniería financiera o los de investigación de operaciones.