



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA**

Análisis, diseño y desarrollo de software para la planeación energética en México

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
Marco Antonio Martínez Quintana

TUTORA PRINCIPAL  
Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez, Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. julio 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Francois Lacouture Juan Luis  
Secretario: Dra. Balderas Cañas Patricia  
Vocal: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia  
1 er Suplente: Dra. Rodríguez Vázquez Katya  
2 do Suplente: M. en C. Salazar Salazar Edgar

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CDMX

**TUTORA DE TESIS:**

Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez

-----  
**FIRMA**



## Resumen

El presente documento muestra el análisis, diseño y desarrollo del modelo de optimización del sector eléctrico MC, el cual es una herramienta computacional para la planeación energética a largo plazo ya que nos ayuda a satisfacer la demanda de años futuros bajo restricciones propuestas como metas de energía limpia, toques de generación de energía, límites de adiciones de capacidad, entre otros. Un aspecto fundamental de este modelo de optimización es que también es regional y horario, es decir se consideran líneas de transmisión entre las regiones de análisis y nos brinda al final de su ejecución, el despacho horario óptimo horario del escenario analizado. Además, se explica la metodología de cómo construye el modelo de manera dinámica haciendo que el número de regiones, tecnologías, enlaces de transmisión y horas sea dinámico dando por resultado diferentes tipos de análisis, desde un análisis uninodal hasta un análisis regional.

## Abstract

This document shows the analysis, design and development of the optimization model of the electric sector named optimizar MC, which is a computational tool for long-term energy planning. It helps us to satisfy the demand of future years under proposed restrictions such as energy goals clean, energy generation limits, limits of capacity additions, among others. A fundamental aspect of this optimization model is that it is also regional and hourly, that is, transmission lines between the analysis regions are considered and, at the end of its execution, it provides us with the optimum hourly schedule of the scenario analyzed. In addition, the methodology of how to build the model is explained dynamically, making the number of regions, technologies, transmission links and hours dynamic, resulting in different types of analysis, from a uninodal analysis to a regional analysis.



# Índice

Índice de figuras .....	3
Índice de tablas .....	5
Introducción .....	7
Planteamiento del problema .....	7
Preguntas de investigación .....	7
Objetivos .....	8
Objetivo general .....	8
Objetivos específicos.....	8
Capítulo 1. Marco teórico .....	9
1.1 Metodología de la planeación energética.....	9
1.2 Consideraciones de modelación y necesidad de datos.....	12
1.2.1 Modelación.....	12
1.2.3. Datos .....	12
1.4 Investigaciones de operaciones en el sector energético .....	17
1.5 Programación lineal como herramienta de optimización.....	18
1.5.1 Función objetivo.....	19
1.5.2 Variables de decisión.....	19
1.5.3 Restricciones .....	19
1.6 Teoría de inventarios.....	20
1.6.1 Modelación y toma de decisiones.....	20
1.6.2Problemas simples .....	22
1.6.3 Problemas complejos .....	22
1.6.4 Problemas dinámicos .....	23
1.6.5 Sistemas de soporte de decisiones .....	23
1.6.6 Modelación matemática .....	23
1.6.7 Enfoque sistémico .....	24
1.6.8 Análisis y construcción de modelos de inventario .....	24
1.6.9 Componentes básicos de un sistema de inventario.....	25
1.6.10 Modelación de decisiones para ordenar.....	26
1.6.11 Modelación del comportamiento del suministro y la demanda.....	27



1.6.12 Modelo EOQ – Economic Order Quantity .....	29
1.7 Algoritmos genéticos.....	32
1.7.1 Cómputo evolutivo.....	32
1.7.2 Modelación de algoritmos genéticos.....	34
Capítulo 2. Desarrollo de software energético .....	41
2.1 Generación de planes de expansión energética utilizando programación lineal .....	41
2.1.1 Diseño del modelo de optimización para la generación de planes de expansión energética.....	42
2.2 Generación de un Plan de Suministro de Agua para una Central Hidroeléctrica de Rebombear con el Enfoque de Inventarios.....	46
2.2.1 Planta hidroeléctrica con bombeo o rebombear .....	47
2.2.2 Funcionamiento .....	47
2.2.3 Desarrollo del modelo.....	48
2.2.3 Nivel de Servicio .....	51
2.3 Algoritmo Genético para la generación de planes de Expansión Energética .....	52
2.3.1 Diseño del algoritmo genético para la generación de planes de expansión energética..	53
Capítulo 3 Modelo de optimización del sector eléctrico MC.....	55
Capítulo 4. Resultados.....	65
Capítulo 5. Conclusiones .....	69
Referencias.....	71

## Índice de figuras

Figura 1 Análisis para la planeación energética .....	10
Figura 2 Ejemplo de un sistema de referencia energético compuesto por cadenas energéticas ....	11
Figura 3 Estructura Modular del SIMISE .....	15
Figura 4 Cuadro comparativo de Problemas de Decisión .....	22
Figura 5 Costos Totales Variables.....	27
Figura 6 Gráfico del modelo EOQ.....	30
Figura 7 Relación entre el costo por mantener y el costo por ordenar para generar el Costo Total Variable (CTV).....	31
Figura 8 Metodología de la computación evolutiva.....	33
Figura 9 Representación Binaria .....	38
Figura 10 Proceso de Codificación y Decodificación .....	38
Figura 11 Método de la Ruleta.....	39
Figura 12 Ejemplo de Cruzamiento .....	40
Figura 13 Modelo de Optimización en Microsoft Excel para la Generación de Planes de Expansión Energética.....	45
Figura 14 Imagen representativa del acuerdo de París .....	46
Figura 15 Partes de una central hidroeléctrica con rebombeo .....	47
Figura 16 Comportamiento del suministro de agua al embalse superior.....	50
Figura 17 Algoritmo genético para la generación de planes de expansión energética desarrollado en Matlab .....	53
Figura 18 Hoja de configuración de tecnologías por región .....	57
Figura 19 Hoja de Catálogo con identificadores para el optimizador MC .....	58
Figura 20 Pestaña de Costos del Optimizador MC.....	59
Figura 21 Hoja de Capacidades del optimizador MC .....	59
Figura 22 Hoja de Adiciones Fijas del año 1 .....	60
Figura 23 Hoja de retiros fijos del año 1 .....	60
Figura 24 Hoja de factor de disponibilidad de tecnologías por región en cada hora para todas las horas.....	61
Figura 25 Hoja de metas de energía limpia.....	61
Figura 26 Hoja de demanda del año 1 .....	62
Figura 27 Hoja de capacidad de enlaces de transmisión .....	62
Figura 28 Optimizador MC en Matlab.....	63
Figura 29 Resultados del optimizador - adiciones de Energía .....	65
Figura 30 Resultados del Optimizador - Despacho horario .....	66
Figura 31 Salidas del Optimizador MC sin procesar .....	67



## Índice de tablas

Tabla 1 Variables de Decisión.....	42
Tabla 2 Tipo de tecnología limpia y convencional .....	43
Tabla 3 Ejemplo de costos asociados a la producción de energía por tipo de tecnología cuando se habla de MWa anuales.....	44
Tabla 4 Distribución de la demanda de agua .....	51



## Introducción

### Planteamiento del problema

El sector energético ha experimentado diversos cambios a lo largo de su historia, actualmente, pasa por un proceso de reformas que hacen que su planeación a largo plazo sea un proceso más complejo y meticuloso.

Todo esto aunado a la tendencia de dejar los combustibles fósiles y reemplazarlos por fuentes renovables y energía nuclear, para mitigar sus emisiones asociadas y con esto disminuir la contaminación y el calentamiento global.

Para ello, en esta tesis propongo realizar software enfocado a las actividades que conlleva la planeación energética, debido a que existen muchos programas extranjeros, pero que no pueden modelar correctamente las características del modelo energético mexicano.

### Preguntas de investigación

Planteando el problema de la planeación energética a largo plazo y centrándonos en la generación de planes de expansión eléctrica, podemos formular las siguientes preguntas a resolver durante el desarrollo de la tesis:

- ✓ ¿Cómo satisfacer la demanda de energía de años futuros al mínimo costo?
- ✓ ¿Cómo limitar las adiciones de capacidad de ciertas tecnologías en las diferentes regiones?
- ✓ ¿Cómo cumplir con las metas de energía limpia planteadas para disminuir emisiones de CO<sub>2</sub>?
- ✓ ¿Cómo tomar en cuenta las adiciones y retiros fijos programados para la planeación del sector eléctrico?
- ✓ ¿Cómo modelar las líneas de transmisión en la optimización, para que se considere un intercambio regional de energía?
- ✓ ¿Cómo limitar las líneas de transmisión de energía para no sobrepasar su límite de capacidad?
- ✓ ¿Cómo proponer nuevas líneas de transmisión a semejanza de la adición de una nueva tecnología?
- ✓ ¿Cómo hacer el balance de energía al importar y exportar energía de otras regiones sin exceder la capacidad de la región de origen?
- ✓ ¿Cómo hacer un despacho óptimo horario que tome en cuenta la disponibilidad de ciertas tecnologías como la solar?
- ✓ ¿Cómo agregar nuevas regiones, tecnologías y pasos de tiempo a la optimización sin rehacer el modelo completo?

## Objetivos

### Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es analizar, diseñar y desarrollar software para la planeación energética, el cual permita como herramienta computacional, realizar estudios del comportamiento del sector ante cambios en parámetros técnicos, económicos, ambientales y sociales, obteniendo como resultado planes de expansión y evaluación de política pública, que permitan colocar a México en el camino del desarrollo y la sustentabilidad.

### Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general presentado anteriormente se formularon los siguientes objetivos:

- ✓ Revisar continuamente software de la industria energética para mantenerme a la vanguardia de los avances tecnológicos en este ámbito.
- ✓ Asistir a congresos, visitas y prácticas de campo, entre otros, para conocer las necesidades de la industria energética en cuestión de desarrollo de software.
- ✓ Redactar la tesis al mismo tiempo que avance en el desarrollo de software.
- ✓ Realizar pruebas unitarias y de integración en cada avance de los software desarrollados.
- ✓ Mantenerme actualizado en los lenguajes de programación existentes para el desarrollo de software

## Capítulo 1. Marco teórico

### 1.1 Metodología de la planeación energética<sup>1</sup>

La planeación energética requiere tomar en cuenta la interacción del sector de energía con el resto de la economía. El proceso de planeación es bastante complejo, debido a que las necesidades de energía que se deben satisfacer cambian continuamente y las posibilidades de la oferta también. La planeación energética es un proceso iterativo y dinámico que involucra varios tipos de análisis que se tienen que repetir periódicamente y ajustar a las condiciones cambiantes, como son el crecimiento poblacional y económico, las innovaciones tecnológicas, el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación ambiental, entre muchas otras.

El estudio y procesamiento sistemático de la información acerca de la demanda y la oferta de energía, histórica y prospectiva, son herramientas para los tomadores de decisiones, quienes deberán definir un conjunto de programas y medidas orientadas a mantener un balance energético al menor costo y con el nivel adecuado de confiabilidad y calidad.

El plan de expansión energético es una declaración de las acciones seleccionadas por los tomadores de decisión, en un punto del tiempo, para alcanzar metas y objetivos específicos.

El desarrollo del software para la planeación energética permitirá como herramienta computacional, realizar estudios del comportamiento del sector ante cambios en parámetros técnicos, económicos, ambientales y sociales, obteniendo como resultado planes de expansión y la evaluación de política pública, que permitan colocar a México en el camino del desarrollo y la sustentabilidad.

La planeación energética requiere principalmente:

- Conocer las tendencias, limitantes y comportamiento del sector, con una visión de largo plazo.
- Atender los requerimientos específicos del sector energético.
- Mantener el control de la información energética.
- Enlazar la demanda y la oferta de energía en las diferentes regiones.
- Evaluar el impacto de las políticas públicas en materia de energía.
- Evaluar las implicaciones de diversos escenarios.

La metodología de planeación energética incluye análisis macroeconómicos, proyecciones de la demanda de energía, análisis de recursos energéticos, caracterización adecuada de las

---

<sup>1</sup> Sistema de Modelación Integral del Sector Energético, Martínez, 2015



tecnologías de conversión de energía y la optimización del balance de oferta y demanda de energía, en donde se relaciona la demanda de cada sector de la economía con los recursos y las tecnologías disponibles para producir los energéticos y la electricidad.

El balance de oferta y demanda es un insumo fundamental para el análisis de impactos ambientales del sector energético. Toda la información, obtenida hasta ahora por los diferentes análisis, se alimenta a un análisis de toma de decisiones que debe contener suficientes elementos para seleccionar el o los mejores planes de expansión energética.

La Figura 1 muestra el conjunto de análisis requeridos para la planeación energética.

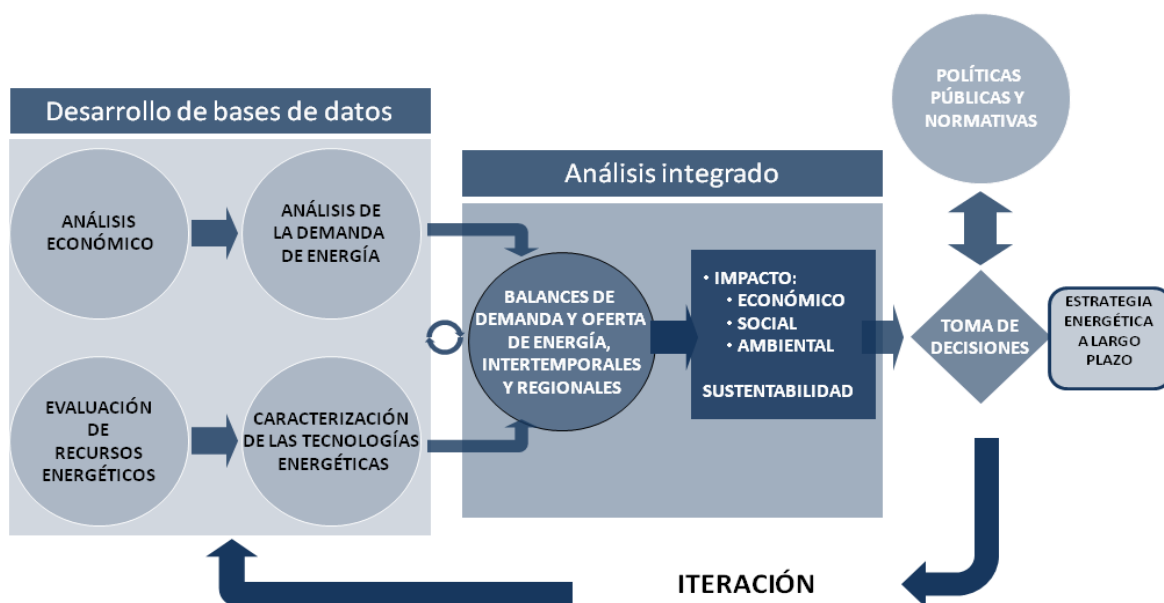


Figura 1 Análisis para la planeación energética

A continuación, se explican los diferentes análisis mostrados en la figura 1 sobre la planeación energética.

Primero, para la parte del análisis económico se considera el comportamiento histórico de las características macroeconómicas y cómo pueden cambiar en el futuro. Se analiza el crecimiento socioeconómico y demográfico y se obtiene el producto interno bruto (PIB) nacional y de cada sector de la economía, así mismo, se hacen proyecciones de los precios de los energéticos en el contexto del comercio internacional.

Después en el análisis de la demanda se evalúan los consumos anuales de energía en los diferentes sectores de la economía, como lo son: el sector industrial, transporte, agropecuario, residencial, público y comercial.



Es importante destacar que el sector energético de nuestro país es muy complejo, pues se trata de un país con una extensión territorial muy grande, con distribución de recursos naturales fósiles y renovables muy heterogéneos, con diferencias importantes en la distribución de la riqueza entre centros urbanos y zonas rurales con desarrollo de infraestructura energética desigual. A todo lo anterior, hay que sumarle que, en este momento, México se encuentra en medio de una transición y reformas energéticas de gran impacto que hace interesante su análisis bajo diferentes escenarios.

## **1.2 Consideraciones de modelación y necesidad de datos**

### 1.2.1 Modelación

La modelación energética en todo el mundo está lidiando con una serie de retos sin precedentes como lo son la descarbonización, la seguridad energética, la efectividad de costos, la intermitencia de las redes eléctricas, la regionalización de los sistemas, entre otros. Los modelos energéticos proveen ideas cuantitativas esenciales para estos retos.

Nunca existirá ni existe un modelo universal que responda todas las preguntas que se le pidan, por ello el diseño de un modelo se hace principalmente para responder preguntas específicas de investigación. Por ello resulta de vital importancia conocer la serie de preguntas a responder por el modelo, de manera que estas hipótesis a probar guíen la modelación de las versiones de cada software. Esto permitirá un desarrollo ágil, enfocado y eficiente del sistema.

A pesar de ello, las partes más importantes de un modelo son las personas que lo crean, lo corren y hacen uso de sus salidas. El desarrollo de una comunidad de usuarios y desarrolladores es tan importante como el desarrollo del modelo.

También es fundamental ser muy transparente acerca del diseño de los supuestos inherentes de los modelos que se utilizan. Todos los modelos tienen supuestos importantes y limitaciones e incluso los modelos con mismos paradigmas son utilizados de forma diferente.

### 1.2.3. Datos

Es importante recalcar que “los modelos son tan buenos como los datos que se tengan para llenarlos o para retarlos”

Un modelo que recibe basura, entrega basura. El término Garbage In, Garbage Out (abreviado como GIGO en inglés, referido a Basura que Entra, Basura que Sale) es una frase del campo de las ciencias de la computación o de las tecnologías de la información y la computación.

Se usa primordialmente para llamar la atención del hecho de que las computadoras incuestionablemente procesarán cualesquiera datos sin sentido (basura entra) y producirán salidas sin sentido (basura sale). También se utiliza para describir las fallas de la toma de decisiones humanas debidas a datos erróneos, incompletos o imprecisos.

Hasta hace muy pocos años, el proceso de planeación admitía con mucha frecuencia una única forma de previsión del futuro: la extrapolación de las tendencias del pasado. Basada en esas previsiones se señalaban los objetivos y se establecían los planes y estrategias adecuadas para alcanzarlos.

### **1.3 Características del Sistema de Modelación Integral del Sector Energético (SIMISE)<sup>2</sup>**

El SIMISE es una solución Business Intelligence (BI) que fue desarrollada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través de la Facultad de Ingeniería (FI), el Instituto de Geofísica, el Instituto de Investigaciones Económicas (IIEc), la Dirección General de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (DGTIC) y la Coordinación de Innovación y Desarrollo (CID) bajo las especificaciones de la Secretaría de Energía (SENER).

El objetivo de su desarrollo es que la SENER cuente con una herramienta computacional propia para modelar de manera integral el sistema energético de México y realizar la planeación estratégica del sector de energía dentro de un contexto de sustentabilidad económica, ambiental y social.

El SIMISE en su versión integral cubre las siguientes funciones:

- Revisión de la situación actual de la oferta y la demanda de México.
- Evaluación de necesidades futuras de demanda por sector, región y energético.
- Pronósticos de la demanda de energéticos de uso final para diferentes escenarios.
- Análisis de elasticidades de la demanda de energéticos.
- Recopilación de información sobre recursos energéticos disponibles.
- Evaluación conjunta de opciones tecnológicas de las etapas de transformación y transporte: infraestructura en refinerías, plantas endulzadoras de gas, y plantas generadoras, así como los requerimientos de infraestructura de transporte y transmisión.
- Desarrollo de escenarios alternativos de balances de oferta y demanda por sector, por energético y por región.
- Identificación de obras de infraestructura y montos de inversión necesarios para cubrir los escenarios de oferta.
- Impacto de la intermitencia de energías renovables.
- Evaluación de medidas económicas, financieras y ambientales.
- Escenarios de impactos atribuibles a innovaciones tecnológicas.

---

<sup>2</sup> Informe Técnico del proyecto SIMISE, Martín del Campo, 2017

Los análisis de planificación se basan en balances integrales sobre la forma en que se consume (uso final), convierte (procesos de transformación), transporta (ductos para transporte de crudo y petrolíferos y redes de transmisión eléctrica) y produce energía (extracción de recursos fósiles y nucleares o aprovechamiento y gestión de recursos renovables) en una región y su interacción con otras regiones (mercados nacionales e internacionales), a partir de consideraciones y restricciones relacionadas con la población, desarrollo económico, tecnología y precios, entre otras.

El SIMISE es un sistema computacional, compuesto por módulos que realizan las diferentes actividades de la planeación energética usando modelos y bases de datos.

Los diferentes módulos están integrados para simular escenarios de demanda y oferta de energéticos y sus emisiones ambientales a largo plazo (desde periodos de 15 años, hasta 30). Cada módulo cuenta con modelos matemáticos para ejecutar las funciones específicas del mismo dentro de la estructura del SIMISE, para realizar análisis y obtener resultados.

Los módulos, los cuales operan relativamente de manera independiente, representan los componentes del sistema energético nacional.

La estructura básica de la plataforma SIMISE se muestra en el diagrama de la Figura 3, el cual está dividido en:

- Módulo de Oferta
- Módulo de Demanda
- Módulo Económico
- Módulo de Optimización
- Sistema Gestor de Base de Datos
- Aplicaciones Auxiliares

A continuación, se describe de manera detallada la importancia de cada uno de estos módulos.

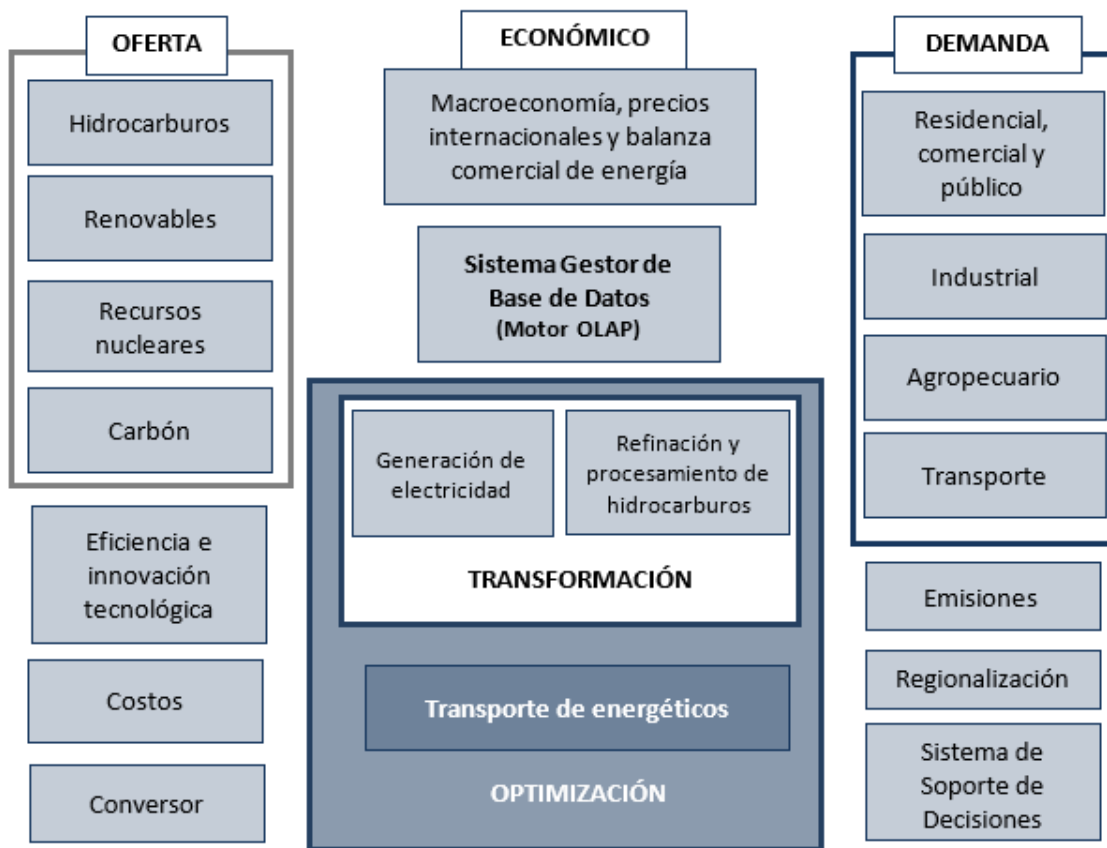


Figura 3 Estructura Modular del SIMISE

SIMISE es un sistema integral de planeación, por lo que cuenta con el Módulo Económico con modelos avanzados para realizar los análisis macroeconómicos del país dentro de un contexto de comercio internacional.

Para analizar la Demanda se desarrollaron modelos econométricos para estimar la demanda energética para los sectores:

- 1) Residencial
- 2) Comercial
- 3) Público
- 4) Agropecuario
- 5) Transporte
- 6) Industrial

Así mismo la estructura del SIMISE incluye cuatro módulos de oferta:

- 1) Hidrocarburos (gas y petróleo)
- 2) Renovables (hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar y biomasa)
- 3) Recursos Nucleares y
- 4) Carbón

Parte medular del SIMISE es su Módulo de Optimización, el cual optimiza la adición de infraestructura con base en la optimización del balance de oferta y demanda.

El balance consiste en acoplar un sistema de referencia energética en el que se representan las cadenas energéticas completas, incluyendo los procesos de extracción de energía, transporte de energía primaria, procesos de transformación, y transporte de energía secundaria a centros de distribución de energía final.

El módulo de optimización interactúa con todos los módulos de SIMISE y su optimización se enfoca en formular planes de expansión del sistema energético mexicano de menor costo total que cumpla con la entrega de la energía demandada para todos los años del periodo, todos los sectores y todas las regiones.

Para proporcionar las características de las tecnologías disponibles para plantas de transformación y transporte de energía, el módulo de optimización del SIMISE cuenta con los siguientes submódulos:

- 1) Generación de electricidad
- 2) Refinación y Procesamiento de Hidrocarburos
- 3) Transmisión Eléctrica y
- 4) Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburos y Derivados.

El Módulo de Generación de Electricidad procesa la información necesaria para planear la generación de electricidad del parque de generación eléctrica existente como aquella proporcionada por plantas candidatas a ser adicionadas. Por otro lado, las plantas de transformación y procesamiento de hidrocarburos incluyen refinación de crudo y procesamiento de gas natural.

Por otra parte, el SIMISE cuenta con un Módulo de Emisiones el cual sirve para cuantificar las emisiones ambientales tanto de los sectores de consumo final, como la producida por los procesos de transformación, las plantas generadoras y las refinerías.

También incluye un Módulo de Costos en el cual se recopilan costos y parámetros de todo tipo de infraestructura del sector energético con el fin de poder realizar comparación entre ellos.

Además, cuenta con un Módulo de Eficiencia e Innovación Tecnológica en el cual se pueden revisar y proyectar incrementos de eficiencia y nuevas tecnologías en el que pueden ser evaluados los escenarios de planeación de largo plazo.

La idea es obtener datos históricos, escenarios, proyecciones, así como toda la información de eficiencia energética, costos, parámetros de reducción de emisiones y otros directamente relacionados con el progreso tecnológico.

Con el objetivo de convertir al SIMISE en un sistema de modelación que se encuentre en el estado del arte de los modelos de planeación usados a nivel mundial, se incluye un Módulo de Regionalización, para procesar la información geográfica de todos los módulos, de tal manera que el módulo de optimización tenga la información necesaria para hacer la optimización considerando que el sistema energético está dividido en diferentes regiones.

El flujo de datos entre los diferentes módulos es manejado por el Sistema Gestor de Base de Datos, el cual es un módulo integrador el cual gestiona que los datos se transfieran con confiabilidad y de manera eficiente, diseñado como el datawarehouse de la solución business intelligence.

#### **1.4 Investigaciones de operaciones en el sector energético**

La investigación de operaciones (IO) es una subdisciplina de las matemáticas que usa métodos analíticos avanzados para ayudar en la toma de decisiones.

La Investigación de Operaciones usa técnicas como las de modelación matemática determinista o estocástica, análisis estadístico, simulación probabilista y optimización matemática para modelar, analizar y resolver problemas complejos tanto de índole determinista como estocástica que surgen en la toma de decisiones.

Por su enfoque multidisciplinario, la Investigación de Operaciones brinda soluciones y apoyo científico a problemas de toma de decisiones en áreas tradicionales como:

- Sistemas de Manufactura
- Industria de servicios
- Problemas de logística y transporte
- Sistemas de cadenas de abastecimiento de productos
- Sistemas de telecomunicaciones
- Ruteo de productos
- Diseño de redes
- Sistemas eléctricos de potencia
- Simulación de procesos de manufactura



- Control de inventarios
- Pronóstico de demanda de producto

Y en nuevos campos como:

- Uso eficiente de recursos naturales (forestación, agua, gas natural, energía eléctrica/eólica)
- Logística humanitaria
- Sector agrícola y agronegocios
- Problemas de cambio climático
- Problemas del sector salud y atención médica
- Problemas en el sector financiero y economía
- Entre muchos otros.

Como se puede notar, el campo de la energía no se escapa de las metodologías utilizadas en la investigación de operaciones y durante esta tesis muestro algunas aplicaciones de estas metodologías aplicadas al sector energético.

### **1.5 Programación lineal como herramienta de optimización**

El objetivo de la Programación Lineal es optimizar, es decir, maximizar o minimizar funciones lineales en varias variables reales con restricciones lineales (sistemas de inequaciones lineales), optimizando una función objetivo también lineal.

Los resultados y el proceso de optimización se convierten en un respaldo cuantitativo de las decisiones frente a las situaciones planteadas. Decisiones en las que sería importante tener en cuenta diversos criterios administrativos como:

- Los hechos
- La experiencia
- La intuición
- La autoridad

El primer paso para la resolución de un problema de programación lineal consiste en la identificación de los elementos básicos de un modelo matemático, estos son:

- Función Objetivo
- Variables de decisión
- Restricciones

El siguiente paso consiste seguir la siguiente metodología:

1. Definir el criterio de la función objetivo
2. Identificar y definir variables de decisión
3. Identificar y definir restricciones
4. Plantear la función objetivo

#### 1.5.1 Función objetivo

La función objetivo tiene una estrecha relación con la pregunta general que se desea responder. Si en un modelo resultan distintas preguntas, la función objetivo se relacionaría con la pregunta del nivel superior, es decir, la pregunta fundamental. Así, por ejemplo, si en una situación se desean minimizar los costos, es muy probable que la pregunta de mayor nivel sea la que se relacione con aumentar la utilidad en lugar de una interrogante que busque hallar la manera de disminuir los costos.

#### 1.5.2 Variables de decisión

Similar a la relación que existe entre objetivos específicos y objetivo general, cómo se comportan las variables de decisión respecto a la función objetivo, puesto que éstas se identifican partiendo de una serie de preguntas derivadas de la pregunta fundamental.

Las variables de decisión son en teoría, factores controlables del sistema que se está modelando, y como tal, éstas pueden tomar diversos valores posibles, de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, que contribuya con la consecución del objetivo de la función general del problema.

#### 1.5.3 Restricciones

Cuando hablamos de las restricciones en un problema de programación lineal, nos referimos a todo aquello que limita la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión.

La mejor manera de hallarlas consiste en pensar en un caso hipotético en el que decidiéramos dar un valor infinito a nuestras variables de decisión, por ejemplo, ¿Qué pasaría si en un problema que precisa minimizar costos en un sistema de producción de algún producto decidiéramos producir una cantidad infinita del mismo?

Seguramente ahora nos surgirían múltiples interrogantes, por ejemplo:

- ¿Cuánta oferta de energía tengo para satisfacer la demanda?
- ¿Con qué tecnologías de transformación cuento para generar energía?
- ¿Cuántas de esas tecnologías proveen energía limpia?

- ¿Cómo afectan la adición y los retiros fijos de capacidad, la satisfacción de la demanda en cada región?
- ¿Cómo afecta la disponibilidad del recurso por cada tecnología al despacho horario para cubrir la demanda?

Entonces, habríamos descubierto que nuestro sistema presenta una serie de limitantes, tanto físicas, como de contexto, de tal manera que los valores que en un momento dado podrían tomar nuestras variables de decisión se encuentran condicionados por una serie de restricciones.

## 1.6 Teoría de inventarios<sup>3</sup>

### 1.6.1 Modelación y toma de decisiones

Un modelo es una abstracción y simplificación de un problema real, idealmente incorpora los elementos y relaciones esenciales del mundo real.

Usar un modelo significa obtener conclusiones lógicas que se derivan del mismo, estas conclusiones deben ser una guía efectiva para la toma de decisiones si el modelo está diseñado y resuelto adecuadamente.

La toma de decisiones involucra la integración de información cuantitativa, obtenida del modelo, con el juicio intuitivo acerca de los factores cualitativos, como la moral y el liderazgo en una organización, las restricciones de empleo, las acciones afirmativas, la contaminación ambiental y otras áreas de responsabilidad social.

Dado que la mente humana no puede considerar cada aspecto de un problema empírico, algunos atributos del problema deben ignorarse si una decisión se va a tomar. Esto es, los procesos de abstracción y simplificación son pasos necesarios en la solución de cualquier problema humano.

Después de que el tomador de decisiones ha seleccionado los factores críticos, o variables, de la situación empírica, se les combina de alguna manera lógica de modo que formen un modelo del problema.

Un modelo es una representación simplificada de una situación empírica. Idealmente, le quita a un fenómeno natural su confusa complejidad y duplica la conducta esencial del fenómeno natural con algunas variables que están simplemente relacionadas.

Entre más simple sea el modelo obtenido, es mejor para el que toma decisiones, ya que el modelo sirve como una razonable y confiable contraparte del problema empírico.

---

<sup>3</sup> Apuntes de Teoría de Inventarios, Balderas, 2018

Las ventajas de un modelo simple son:

1. Es económico en cuanto al tiempo y pensamiento.
2. Puede ser entendido fácilmente por el que toma decisiones.
3. En caso necesario, el modelo puede modificarse rápida y efectivamente.

Después de que el modelo se ha construido, se pueden derivar conclusiones acerca de su comportamiento por medio del análisis lógico. El que toma decisiones basa entonces sus acciones o decisiones en estas conclusiones.

Dos fuentes importantes de error en el uso de modelos para la toma de decisiones son la exclusión de variables importantes y los errores al definir las relaciones entre las variables.

Por ejemplo, supóngase que puede esperarse una pérdida del 40 %, en los rendimientos de un proceso de producción, debida a especificaciones restringidas inusuales.

La omisión de este factor en el análisis daría por resultado que el modelo resultante no representaría la situación adecuadamente, para los propósitos de decisión, de hecho, podría tomarse una decisión equivocada.

La técnica apropiada para describir y relacionar las variables seleccionadas depende en gran medida de la naturaleza de las variables. Si las variables son susceptibles de alguna forma de medición, y particularmente si pueden dárseles una representación cuantitativa, entonces hay fuertes razones para seleccionar una representación matemática del modelo.

Primero, porque hay una disciplina inherente rigurosa en las matemáticas que asegura un procedimiento metódico por parte del investigador. Se debe ser específico acerca de qué variables se han seleccionado y qué relaciones se asume que existen entre ellas.

Segundo, la matemática es una poderosa técnica para relacionar variables y derivar conclusiones lógicas a partir de premisas dadas. Las matemáticas, combinadas con las modernas computadoras, hacen posible el manejo de los problemas que requieren modelos de gran complejidad y facilita el proceso de toma de decisiones, donde el análisis cuantitativo es aplicable.

El análisis cuantitativo se ha extendido a muchas áreas de las operaciones de negocios de las empresas y se ha vuelto un modo efectivo de enfocar ciertos problemas de decisión.

Para tomar una decisión, se establece el criterio, se seleccionan alternativas, se determina un modelo para evaluar las alternativas y seleccionar la mejor alternativa.

Las decisiones pueden caracterizarse conforme se toman bajo certidumbre o incertidumbre, dependiendo de si o no los factores principales se asumen como conocidos.

La toma de decisiones bajo incertidumbre involucra el uso de probabilidades para expresar la probabilidad de eventos inciertos.

Los problemas de decisión pueden clasificarse como simples (si hay pocas variables importantes), complejos (si hay muchas), o dinámicos (si las decisiones se interrelacionan con el transcurso del tiempo).

A continuación, se resume la clasificación anterior tomada de las notas de clase de la Dra. Patricia E. Balderas Cañas en la materia Teoría de Inventarios:

Variables principales en un problema de decisión		
Problema de decisión	Certidumbre	Incertidumbre
Simple	Modelos de caso	Análisis de decisión (árboles de decisión)
Complejo	Modelos de caso Programación lineal y entera	Simulación
Dinámico	Modelos de inventario Modelos PERT (trayectorias críticas)	Simulación Modelos de inventario Modelos de líneas de espera

*Figura 4 Cuadro comparativo de Problemas de Decisión*

### 1.6.2 Problemas simples

Todos los problemas son simplificados al construir un modelo para cualquier análisis. Si de esto resulta sólo un número pequeño de factores o variables y relativamente pocas alternativas, entonces el modelo se denomina simple.

Un modelo de caso o escenario es un modelo de un problema de decisión que se analiza ensayando una serie de casos (posibles resultados o escenarios) usando diferentes alternativas o supuestos. El modelo no está programado para encontrar directamente “la mejor solución”. En lugar de eso, el administrador usa el modelo en un proceso de ensayo y error.

Los modelos de optimización usan procedimientos matemáticos para encontrar la solución óptima e incorporan el uso de probabilidades en la toma de decisiones bajo incertidumbre.

### 1.6.3 Problemas complejos

Muchos problemas de decisión involucran una gran cantidad de factores o variables importantes, o pueden tener varias alternativas para considerar. Por ejemplo, el problema de decisión de programar el suministro de fábricas a consumidores, a fin de minimizar el costo, involucra cientos de variables y restricciones que pueden tener millones de soluciones.

Los modelos de programación lineal y entera son las técnicas más ampliamente utilizadas para resolver complejos problemas de negocios de este tipo. Usan las técnicas matemáticas para encontrar el máximo (o el mínimo) valor de un objetivo (función), sujeto a un conjunto de restricciones como se mostró en el tema anterior relativo a Programación Lineal.

Simulación es una técnica para modelar problemas complejos que involucran situaciones con incertidumbre. Se diseña un modelo para reproducir el comportamiento de un sistema. Los modelos de simulación usualmente se analizan con el enfoque de estudio de caso por caso (en contraposición a la optimización).

#### 1.6.4 Problemas dinámicos

Los problemas de decisión dinámicos consideran un tipo particular de complejidad, cuando hay una sucesión de decisiones interrelacionadas a lo largo de varios periodos de tiempo.

Algunos tipos son los modelos de inventario para determinar cuándo solicitar un inventario y qué tantas existencias se deben tener; PERT o modelos de rutas críticas para la programación de proyectos y los modelos de líneas de espera para problemas que involucran tráfico o acumulación.

#### 1.6.5 Sistemas de soporte de decisiones

Un sistema de soporte de Decisiones (DSS por sus siglas en inglés, Decision Support System), es un sistema computarizado integrado y diseñado para ayudar en la toma de decisiones.

Un Sistema de Soporte de Decisiones incorpora generalmente un modelo (alguno de los señalados arriba), y el sistema computarizado desempeña los cálculos necesarios para resolver el modelo. Generalmente, es más que un modelo, incluye además una base de datos que puede emplearse para proporcionar directamente información al administrador (o al modelo), mediante gráficas o diversos reportes que son fáciles de entender por el usuario.

Desde luego que incorpora también tecnología computacional para facilitar el análisis que se requiere en el problema de decisión o para indagar en la base de datos la información requerida.

#### 1.6.6 Modelación matemática

Es el proceso mediante el cual un sistema físico se traduce en un modelo matemático. Esta modelación considera la naturaleza de la modelación matemática y el enfoque del proceso de modelación.

### 1.6.7 Enfoque sistémico

El enfoque sistémico ofrece un marco teórico que permite ver el problema inmerso en un sistema. Se identifican claramente las características del sistema que son fundamentales para el problema. El proceso de construcción del modelo matemático puede verse de manera simple como un proceso iterativo de múltiples etapas.

Las etapas principales en la traducción de un problema del mundo real a la descripción matemática según Murthy and Page son las siguientes.

4. Formulación del problema
5. Descripción matemática
6. Análisis matemático
7. Interpretación del análisis para obtener una solución

### 1.6.8 Análisis y construcción de modelos de inventario

Enseguida se hace una definición de inventario, con el objetivo de hacer un control o manejo administrativo del mismo.

**Definición 1.** Un inventario es la cantidad de bienes o materiales en el control de una empresa, que se mantienen por un tiempo en un estado relativamente ocioso o improductivo, en espera de un uso posterior o a la venta.

La definición anterior sugiere que la existencia de un inventario tiene que ver con dos procesos el suministro y la demanda.

El primero, usualmente precede al segundo y contribuye con bienes al inventario, mientras que la demanda le sigue y reduce el nivel del inventario. Ambos procesos, suministro y demanda suelen ocurrir acompañadamente.

La definición anterior excluye a los oleoductos y gasoductos, porque no satisfacen una demanda mientras se encuentran en las tuberías. Los bienes se convierten en inventarios cuando se mantienen sin uso, lo cual no sucede con los ductos en general.

Las funciones de un inventario se pueden agrupar en cinco categorías:

1. Por razones de mercado. Por ejemplo, cuando la disponibilidad de un bien proporciona una ventaja económica.
2. Para protegerse del faltante de un bien. Debido principalmente a que los procesos de suministro y demanda fluctúan arbitrariamente, se tiene el riesgo de que ocurran faltantes y ocasionar molestias a los clientes, por ejemplo.

3. Para tener operaciones sin contratiempos. Por ejemplo, con los cambios en la demanda de productos que se venden por temporadas.
4. Para tener un tamaño del pedido, económico. Lo cual supone hacer una decisión entre el tamaño de un pedido y el número de veces que se hace el pedido, en condiciones diversas, por ejemplo, cuando el precio de los bienes depende del volumen de compra.
5. Para tener un sistema de control del inventario, económico.

En el control de un inventario, como un proceso de decisión, se destacan las siguientes acciones.

- Establecer el criterio a usarse. Por ejemplo, minimizar los costos por mantener un inventario.
- Seleccionar un conjunto de alternativas para consideración.
- Determinar el modelo a usarse y los valores de los parámetros del proceso. Por ejemplo, en una cadena de suministro, los costos variables por mantener una unidad en inventario son:

$$\text{Costos variables} = K(\text{costo unitario por ordenar}) + h(\text{inventario promedio})$$

Los parámetros K y h, deben determinarse para utilizar el modelo.

K = costo unitario por ordenar  
h = costo unitario por mantener

- Determinar que alternativa es óptima (es decir, produce el mejor valor), según el criterio establecido en el punto 1.

#### 1.6.9 Componentes básicos de un sistema de inventario

El inventario existe porque las tasas de suministro y demanda difieren generalmente, y cuando se requiere disponer de los bienes involucrados, almacenados en algún lugar.

Dichas tasas se representan como:

$$s(t), d(t)$$

respectivamente.

El nivel del inventario resultante, de los procesos de suministro y demanda, lo representamos con:

$$Q(t)$$



Una manera de relacionar las tres cantidades anteriores es mediante la expresión:

$$Q(t) = Q(0) + \int_0^t [s(t) - d(t)]dt$$

Los costos y beneficios relacionados con un inventario son los costos por almacenar una unidad de ese inventario  $h$ , por unidad de tiempo; los costos por faltantes  $p$ , por unidad de tiempo; los costos por colocar o hacer un pedido  $K$ , ordenar, o simplemente los costos por ordenar; los costos por comprar, cuando se tienen descuentos en función del volumen del pedido y los costos por el sistema de inventario, que dependen de la cantidad y calidad del esfuerzo realizado por administrar el inventario.

#### 1.6.10 Modelación de decisiones para ordenar

Un modelo es una aproximación a una realidad, por lo que su valor se concentra en la medida en que nos permite hacer decisiones eficaces de manera eficiente. Para el logro de ese valor, un modelo debe captar suficientemente la esencia de esa realidad, sin demasiado esfuerzo y costo. Una medida de ese valor es la suma de los costos asociados con el uso del modelo. Estos costos caen naturalmente en dos categorías. Los costos controlables, aquellos en los que se incurre cuando se desarrolla, usa y mantiene un modelo, los cuales están relacionados con el tiempo de los analistas, la recolección de datos, el procesamiento de datos, entre otros.

En la construcción de un modelo, se prefiere aproximar los costos controlables, de la manera más simple posible, para evitar que se nos escapen de la mano. Los costos resultantes son aquellos en los que se incurre como consecuencia del uso del modelo y ellos incluyen costos relacionados con el inventario tales como los costos por mantener, por faltantes y por ordenar. Gráficamente, la relación entre los costos controlables, resultantes y totales, se muestra en la gráfica de la Figura 5

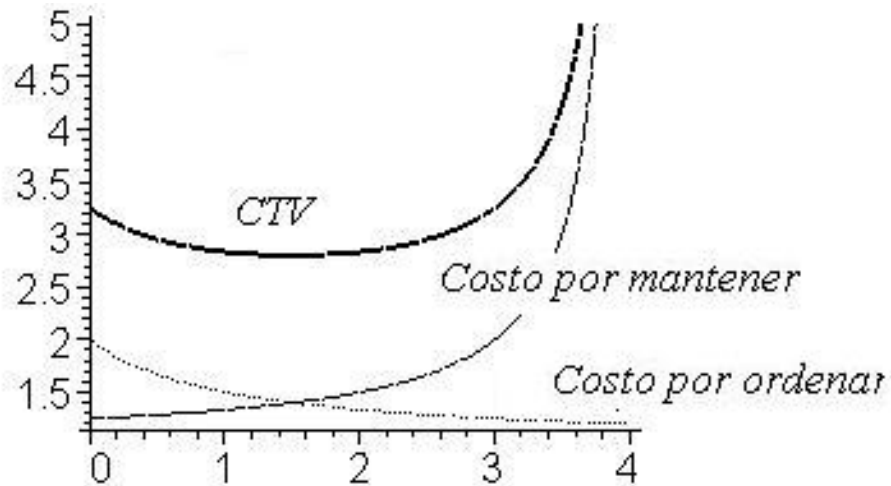


Figura 5 Costos Totales Variables

#### 1.6.11 Modelación del comportamiento del suministro y la demanda

La actividad más importante en el desarrollo de un adecuado modelo de control de inventario es describir las consecuencias físicas de tomar una decisión de control. El control principal sobre un inventario incluye una actividad de suministro, de modo que los términos control y suministro, se relacionan estrechamente. La diferencia es que el suministro ocurre como resultado de una decisión de control. De ahí, que en lo sucesivo se considerará una decisión de ordenar, como sinónimo de una decisión de control.

Para modelar el comportamiento del suministro es necesario relacionar el suministro actual con la decisión de ordenar. Las dos cantidades generalmente difieren en magnitud y/o tiempo de realización. La mayoría de los modelos de inventario, asumen que la cantidad suministrada es igual a la ordenada. El tiempo de suministro o abasto generalmente tiene retraso con relación al tiempo de colocación de una orden o pedido, por dos razones, por la colocación de una orden y por la rapidez en que se realiza el suministro. Respecto a la primera razón, una orden o pedido se hace después de que varias actividades se ejecutan, como hacer papeleo, tener los materiales a la mano, transportar materiales, entre otros. Todos los retrasos asociados a las actividades anteriores se consideran juntos en una variable denominada tiempo de retraso, en el suministro de una orden, (L). Esta variable puede tratarse como constante o aleatoria o bien, ignorarse. Si el tiempo de retraso es apreciable, el tiempo para tomar la decisión de ordenar, puede considerarse como una decisión, dependiendo cuando la orden de suministro solicitado debería llegar, en lugar de cuando debería colocarse una orden. Esta convención no es del todo satisfactoria en los casos en que la demanda tiene una gran variabilidad aleatoria.

La segunda razón del porqué el suministro no coincide, en tiempo, con una decisión de ordenar es que la rapidez del suministro es finita. Como el caso, en que la orden es una orden de producción en lugar de una orden de compra. De nuevo, los tiempos de retraso, entre la colocación de la orden de producción y el inicio de la producción, usualmente se ignoran, a pesar de que se pueden incluir en el modelo.

Mientras que el suministro se suele modelar como cantidades conocidas, es decir, con certidumbre y con base en la cantidad a ordenar, la demanda frecuentemente no se le trata de esa manera. En la siguiente sección, se aborda el tratamiento de la demanda como una cantidad conocida, esto es con certidumbre. Por ejemplo, la materia prima o los insumos que se requieren para las actividades de manufactura, tienen demanda conocida en la medida en que se conoce la calendarización de la producción. Aún en esta situación, hay que tener en cuenta la variación que podría deberse a diversos acontecimientos como problemas de calidad, tolerancia para los desechos y cambios en la ingeniería. El grado de predicción es el que determina las decisiones de modelación para manejar demandas futuras como conocidas o no. El grado de predicción no se pretende que sea una cantidad definida precisamente. En los casos en que se usan y monitorean, pronósticos de la demanda, un grado alto de predicción corresponde a un bajo grado de error en el pronóstico y viceversa. Es importante dejar claro que la característica de no predicción o incertidumbre no es sinónimo de variabilidad. La demanda puede mostrar una gran variabilidad, sin embargo, ser predecible, como en el caso de la demanda de la renovación de placas de circulación. Es la variación aleatoria en la demanda la que causa que las demandas futuras sean impredecibles.

De lo anterior, las demandas para periodos futuros, se consideren cantidades conocidas o variables aleatorias.

Puesto que la demanda usualmente es la única cantidad, tratada como una variable aleatoria en un modelo de decisión para ordenar, o los posibles tiempos de retraso, los modelos de inventario correspondientes, se le denominan determinísticos si la demanda se le trata como conocida y probabilístico o estocástico si la demanda se modela como una variable aleatoria.

En un modelo determinista, la demanda puede considerarse constante o variable. En el caso variable, la demanda puede variar continuamente, en cada punto del tiempo considerado, o bien como variable periódicamente. En este último caso, el horizonte de estudio se divide en intervalos de tiempo, llamados periodos. Si la demanda se considera constante, la distinción entre la tasa de la demanda y la demanda por periodos se reduce a una diferencia entre las unidades de tiempo consideradas. Obviamente, no hay diferencia entre una demanda semanal de diez unidades y una de 20 unidades por dos semanas.

En los modelos estocásticos, se prefiere el enfoque periódico para expresar la demanda, sobre el enfoque continuo de la tasa de la demanda. Lo anterior se debe a que conceptualmente es mucho más directo, tratar la demanda por unidad fija de intervalo de tiempo o periodo, como una variable aleatoria en lugar de la tasa de la demanda, una tasa de demanda aleatoria con variación continua, puede generar cálculos de los niveles de inventario sumamente complejos.

De ahí que, en los modelos estocásticos de inventarios, se asigna a la demanda por periodos, una distribución de probabilidad, como una normal o una uniforme, por la disponibilidad de sus valores.

#### 1.6.12 Modelo EOQ – Economic Order Quantity

El propósito del modelo de lote económico EOQ, es elegir la cantidad a ordenar que sea más económica. Bajo los supuestos de entrega inmediata, sin faltantes y costos de adquisición fijos, la única variable es la cantidad a ordenar  $Q$ , el número de unidades ordenadas o pedidas, ya sea por medio de compra o producción, que abastece al inventario cuando se debe de reabastecer.

Así, cuando el inventario llega a 0 y se reabastece inmediatamente, el nivel del inventario salta de 0 a  $Q$ .

Con una tasa de demanda constante, el nivel del inventario disminuye con el paso del tiempo, a esa tasa hasta que el nivel llegue a 0 y de nuevo se reabastece.

Entonces el objetivo es seleccionar  $Q$  de modo que se minimice el

$$CTV = \text{Costo Total Variable}$$

En este costo se excluye el costo del producto, porque éste es un costo fijo. Tampoco incluye costos por faltantes, puesto que no se permiten faltantes. De ahí que, el costo total variable se calcule como sigue:

$$CTV = \text{Costo inicial anual} + \text{Costo por mantener anual}$$

Donde

$$\text{Costo inicial anual} = k * \text{número de inicios preparaciones anuales}$$

$$\text{Costo por mantener anual} = h * \text{nivel promedio del inventario}$$

y

$K = \text{costo inicial cada vez que ocurre un pedido}$

$h = \text{costo unitario por mantener el inventario}$

El patrón de niveles de inventario a través del tiempo, supuesto para el modelo básico del EOQ, con  $Q$  la variable de decisión es el mostrado en la Figura 6.

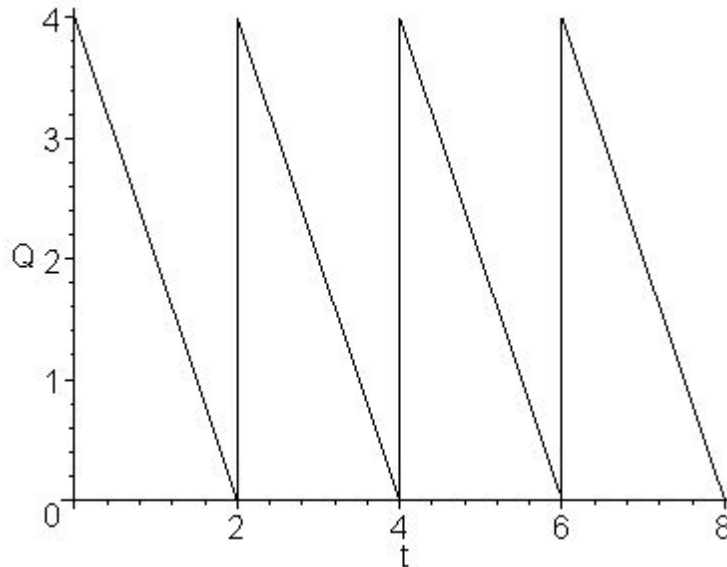


Figura 6 Gráfico del modelo EOQ

En general, el número de inicios o colocaciones de pedidos es:

$$\text{Número de inicios por año} = \frac{\text{tasa de demanda anual}}{\text{cantidad a ordenar}} = \frac{D}{Q}$$

y el nivel promedio del inventario

$$\text{Nivel promedio del inventario} = \frac{\text{nivel máximo} + \text{nivel mínimo}}{2} = \frac{Q}{2}$$

Por lo que, el costo total variable es

$$CTV = k \frac{D}{Q} + h \frac{Q}{2}$$

El lado derecho de la relación anterior expresa que el costo inicial anual y el costo por mantener anual varían con la cantidad  $Q$  a ordenar. El costo inicial disminuye conforme  $Q$  aumenta porque dicho costo es el producto de la constante  $kD$  y el factor variable  $1/Q$ .

En cambio, el costo por mantener anual aumenta proporcionalmente cuando  $Q$  aumenta, porque dicho costo es el producto de la constante  $h/2$  y el factor variable  $Q$ .

La relación entre el costo total variable, el costo inicial anual y el costo por mantener anual, se muestra gráficamente en la Figura 7.

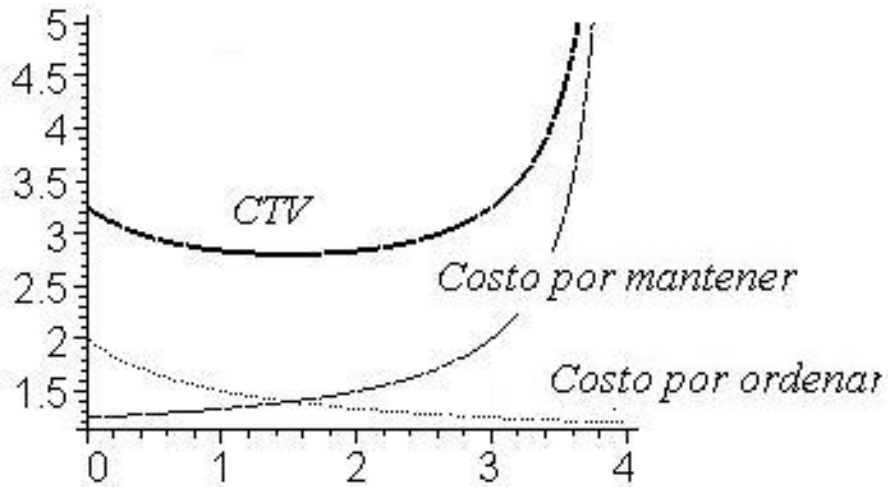


Figura 7 Relación entre el costo por mantener y el costo por ordenar para generar el Costo Total Variable (CTV)

Para cada valor de  $Q$ , el valor en la curva del CTV es la suma de los valores de las dos curvas inferiores, así que el valor de  $Q$  que da el valor mínimo del CTV, es el punto donde los costos por ordenar y por mantener son iguales, esto es en el punto de intersección de ambas curvas, a este valor se le representa por  $Q^*$  y se determina expresando algebraicamente la relación de igualdad

$$k \frac{Q}{2} = h \frac{D}{Q}$$

Resolviendo para  $Q$  tenemos:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2kD}{h}}$$

donde

$D$  = tasa de demanda anual

$K$  = costo inicial por ordenar

$h$  = costo unitario por mantener

Ésta es la fórmula de la raíz cuadrada para el cálculo del nivel óptimo del inventario.

También se obtiene  $Q^*$ , utilizando el criterio de la segunda derivada, el cual permite obtener el valor crítico que minimiza a la función  $CTV$ .

Por lo tanto, la decisión de ordenar  $EOQ = Q^*$  produce el valor mínimo de los costos totales variables de la siguiente manera:

$$CTV^* = k \frac{D}{Q^*} + h \frac{Q^*}{2}$$

## 1.7 Algoritmos genéticos<sup>4</sup>

### 1.7.1 Cómputo evolutivo

A lo largo de varios miles de años los seres vivos que habitan la Tierra han sido sometidos a diversas pruebas que les impone el medio en el cual viven. Los mecanismos que han permitido a estos individuos adaptarse a su entorno son principalmente la recombinación de su material genético (ADN), que en conjunto se denomina genotipo del individuo, y en menor grado las mutaciones (que resultan benéficas).

Recombinación y mutación dotan a los individuos de nuevas características estructurales, fisiológicas o etológicas (fenotipo) que mediante la selección natural son puestas a prueba y si son adecuadas para que el individuo se desarrolle adecuadamente en su entorno, le permiten tener mayor éxito reproductivo dando como resultado que estas características se pasen a las siguientes generaciones.

Estos mecanismos que actúan a lo largo de varias generaciones resultan en la adaptación de una especie a su ambiente, proceso conocido como evolución. Podemos decir que cada individuo es una solución al problema de sobrevivir en un medio determinado.

La computación evolutiva (CE) imita de manera parcial los mecanismos de evolución biológica, y tiene como base un método que se puede observar en la figura 11. Las principales técnicas en computación evolutiva son tres: algoritmos genéticos (AGs), programación evolutiva (PE) y estrategias evolutivas (EEs). AGs, PE y EEs también son conocidos como algoritmos evolutivos (AE).

Cada uno de los algoritmos evolutivos trabaja con individuos, que son representados por estructuras de datos, cada individuo es una posible solución para el problema que intentamos resolver con computación evolutiva. La posible solución que representa cada

---

<sup>4</sup> Algoritmos Genéticos, Rodríguez, 2018

individuo corresponde a su genotipo, a partir del cual se obtendrá un fenotipo con el que se evaluará a cada individuo.

Después de la evaluación, se seleccionarán algunos de los individuos que mejor se aproximen a la solución que queremos encontrar. A los individuos seleccionados se aplicarán operadores que modificarán su estructura simulando los mecanismos de recombinación y mutación que tienen lugar en la naturaleza.

A dichos operadores comúnmente se les conoce como operadores evolutivos. Estas acciones se realizarán un determinado número de veces, dependiendo de un criterio que permitirá decidir si se finaliza el proceso. Cada ocasión en que se realizan la evaluación de un individuo y se aplican los operadores genéticos se conoce como generación.

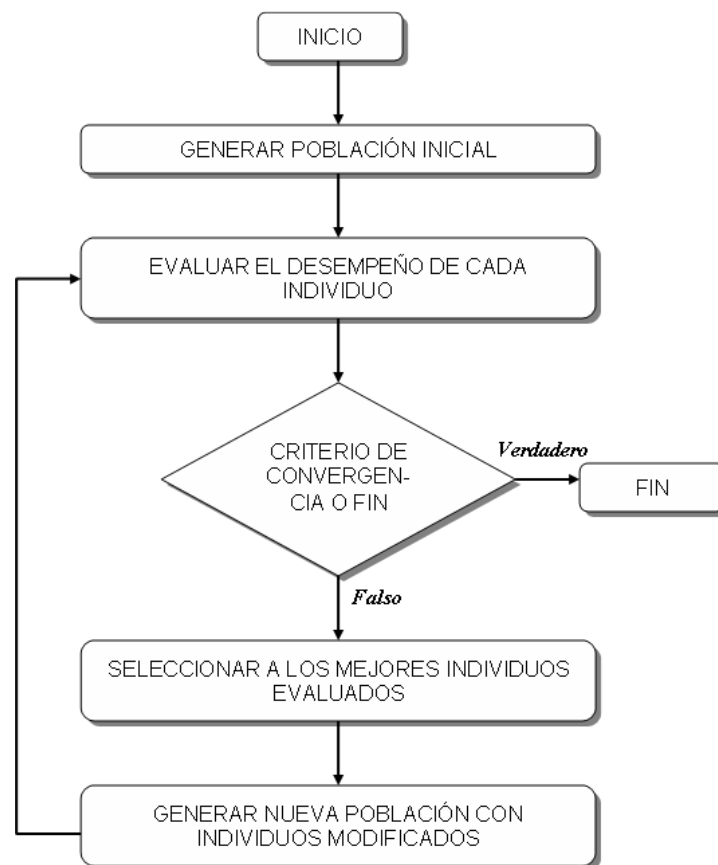


Figura 83 Metodología de la computación evolutiva

Como dato histórico en la década de los sesenta John H. Holland, en conjunto con otras personas, desarrolló en la Universidad de Michigan lo que se conoce como Algoritmos Genéticos. Cabe destacar que el objetivo de Holland no era proponer un método de



optimización basado en los mecanismos de la evolución natural, por el contrario, Holland, deseaba estudiar de manera formal el mecanismo de adaptación de sistemas naturales y artificiales.

### 1.7.2 Modelación de algoritmos genéticos

Un Algoritmo Genético (AG) es una estrategia de búsqueda inspirada en los mecanismos de adaptación de los sistemas biológicos (sistema adaptativo artificial).

El Sistema Adaptativo Natural tiene las siguientes características:

- Las características de un organismo están determinadas por los genes en sus cromosomas
- Cada gen tiene diversas formas o alelos que producen diferentes características asociadas a ese gen
- Existen decenas de miles de genes en los cromosomas de un vertebrado típico
- Si se define el conjunto  $\alpha$  como el conjunto de todos los cromosomas que se obtiene a partir de todas las posibles combinaciones de alelos, se observa que  $\alpha$  tiene del orden de  $2^{10000} \cong 10^{3000}$  cromosomas distintos, considerando solo dos alelos por gen
- Aún una población muy grande, e.j.  $10000 \times 10^6$  (la población mundial  $\cong 6000 \times 10^6$ ) de individuos representa una pequeña porción de  $\alpha$ .
- La probabilidad de producir individuos aptos con una muestra aleatoria de  $\alpha$  es prácticamente 0.

Las características de la Epistasis son:

- El enorme número de posibles estructuras genéticas (genotipo), para cada especie de vertebrados, es una contribución importante a la complejidad del sistema adaptativo natural
- Pero, la mayor parte de la complejidad de estos sistemas se debe a las interacciones que existen entre los genes
- Diferentes alelos de un mismo gen producen diferentes proteínas asociadas, cada proteína o conjunto de ellas forman catalizadores biológicos conocidos como enzimas. Así, los genes controlan las reacciones químicas que se dan en una célula
- En muchas ocasiones, los productos de una cierta reacción química se utilizan en muchas otras reacciones de la célula
- Los efectos de diferentes enzimas no son aditivos (e.j. si una secuencia de reacciones químicas depende de varias enzimas, la secuencia no se da hasta que están presentes todas las enzimas (Esto es la epistasis)

- Esto es, el efecto de un alelo depende fuertemente de que otros alelos estén presentes en el cromosoma
- El conjunto de características de un organismo (fenotipo) depende en gran medida de procesos epistáticos (no podemos asignarle un peso a cada alelo individual por el desempeño del fenotipo)
- El proceso de adaptación consiste entonces en la búsqueda de un conjunto de alelos coadaptados: alelos de diferentes genes que juntos aumentan el desempeño (en un cierto ambiente) del fenotipo correspondiente

Ahora, ¿Cómo transformar estructuras inicialmente inapropiadas en estructuras apropiadas a una variedad de nichos ambientales (plan adaptativo)?

- En genética matemática, la acción del ambiente  $E \in \varepsilon$  sobre el fenotipo (y por tanto el genotipo  $A \in \alpha$ ) se concentra en una medida de desempeño  $\mu_E$  llamada aptitud (fitness) (número de sus descendientes que sobrevive para reproducirse)
- Dentro de una población la aptitud de un individuo está relacionada con su influencia en el desarrollo futuro de la población (si muchos descendientes de un individuo sobreviven para reproducirse, muchos miembros de la población resultante tendrán los alelos del individuo original).

La evaluación de los genotipos en una población puede verse como un proceso de muestreo, donde el espacio de búsqueda es el conjunto de todos los posibles genotipos ( $\alpha$ ) y el resultado de cada muestra es el desempeño  $\mu_E$  del fenotipo correspondiente

Por lo tanto, el resultado  $\mu_E(A)$  es afectado al plan de muestreo de la siguiente manera:

- En un sistema genético la influencia de cada individuo  $A \in \alpha$  es directamente proporcional a su aptitud  $\mu_E(A)$  (la reproducción en proporción al desempeño observado ha producido buenos resultados en la implementación de planes de muestreo o planes reproductivos, aplicables en cualquier problema de adaptación).
- Si el número de descendientes de un individuo es proporcional a su desempeño, se asegura que los conjuntos coadaptados de alelos de los individuos más aptos, pasen a la siguiente generación.
- Después de varias generaciones, el material genético de la población consistirá, principalmente, de los conjuntos coadaptados de genes, que han demostrado mejor desempeño.
- De esta manera, el plan reproductivo toma en cuenta la experiencia pasada la cual queda almacenada en el material genético de cada generación.
- La reproducción no genera nuevas estructuras para ser evaluadas en el ambiente.

- Nuevas estructuras son generadas mediante los operadores genéticos que preservan la mayoría de los conjuntos coadaptados de alelos de la generación actual, pero al mismo tiempo producen nuevos conjuntos de alelos para su evaluación.

Los operadores genéticos principales son:

- Cruzamiento
- Mutación

Por tanto,

- Un algoritmo genético constituye la implementación de un plan de muestreo (adaptación) reproductivo, que utiliza como operadores genéticos principales la cruce y la mutación aleatoria con baja probabilidad.

Los AG procesan y saben que producirán resultados óptimos para un problema en particular porque manejan plantillas de similitudes (Esquema) los cuales tienen las siguientes características:

- Un esquema es una plantilla de similitudes que representa a un subconjunto de cadenas con correspondencias en ciertas posiciones
- Para el alfabeto binario {0,1}, si se considera un tercer elemento \* (no importa), se pueden crear cadenas (esquemas) sobre el alfabeto {0,1,\*}
- Un esquema puede verse como un mecanismo de correspondencia de patrones. Un cierto esquema corresponde a un patrón si los 1's y 0's en el patrón y el esquema corresponden para todas las posiciones.
- E.j. el esquema {\* 0 0 0 0} está presente en las cadenas {1 0 0 0 0} y {0 0 0 0 0}; el esquema {\* 1 1 1 \*} está presente en las cadenas {0 1 1 1 0}, {0 1 1 1 1}, {1 1 1 1 0} y {1 1 1 1 1}.
- El \* es un elemento de notación que permite presentar todas las posibles similitudes entre cadenas de una cierta longitud y alfabeto y no es procesado explícitamente por un AG.
- El número total de esquemas posibles para cadenas de longitud  $l$  sobre un alfabeto de cardinal  $k$ , está dado por:  $(k + 1)^l$
- Para  $k=2$  y  $l=5$ ,  $N_s=243$
- Los esquemas nos permiten evaluar cuánta info. se incorpora en el proceso de búsqueda (optimización) si incluimos las similitudes en las cadenas de la población
- La cadena {1 1 1 1 1} es uno de los  $2^5$  esquemas

- Una cadena de longitud  $l$  contiene  $2^l$  esquemas, por tanto una población de tamaño  $n$  contiene entre  $2^l$  y  $n2^l$  esquemas dependiendo de la variedad en la población.

Algunas propiedades de los esquemas son:

- Orden: Es el número de posiciones fijas (con valor definido de 0 o 1) en un esquema.
- Dados  $H1 = \{0\ 1\ 1\ * \ 1\ * \ * \}$  y  $H2 = \{0\ * \ * \ * \ * \ * \ * \}$ ,  $o(H1)=4$  y  $o(H2)=1$
- El orden de un esquema es una medida de su especificidad
- Longitud: Es la distancia entre la primera y la última posición fija de un esquema.
- $\delta(H1) = 5-1=4$ , y  $\delta(H2) = 0$
- La longitud es una medida de la probabilidad de supervivencia de un esquema al aplicar la cruce

Poblaciones pequeñas contienen una gran cantidad de información sobre las correspondencias que existen en las cadenas que forman la población

De los  $2^l$  a  $n2^l$  posibles esquemas en una población (binaria), los procesados por un AG se comportan de la siguiente manera

- La selección asigna un número creciente de evaluaciones a cadenas con alto desempeño
- La aplicación de la cruce crea nuevas cadenas manteniendo las cadenas con menor longitud
- Si la mutación es suficientemente baja tampoco altera cadenas con longitud corta
- Los esquemas con longitud corta se conocen como bloques constructores
- Por tanto, un AG asigna un número creciente de evaluaciones a los bloques constructores asociados con un mejor desempeño

Tomando esto en cuenta, Holland propone mecanismos para selección de individuos y para su cruce. Actualmente existen muchas más propuestas, sin embargo, la propuesta original de Holland se conoce actualmente como AG Simple o Básico. En este se considera que los códigos genéticos están en binario.

De manera desglosada los pasos a seguir para el Algoritmo genético binario son:

1. Codificación del dominio.
2. Generar la población inicial de  $N$  individuos (aleatoreamente).
3. Evaluar cada individuo de la población.
4. Selección a los individuos.
5. Aquellos individuos seleccionados se combinan
6. Mutación de individuos

7. Obtener N individuos
8. Volver al paso 3, si no se cumple criterio de fin

La codificación es la representación de los cromosomas mediante una estructura de símbolos como se muestra en la Figura 9

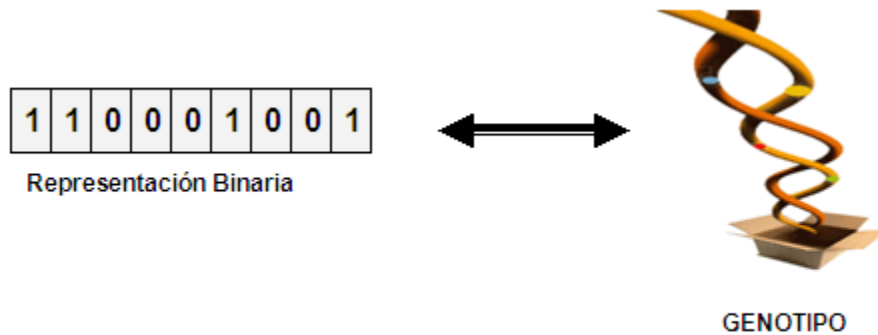


Figura 9 Representación Binaria

Cuando se hace el mapeo de genotipo a fenotipo se le llama decodificación y el proceso inverso es la codificación como se muestra en la Figura 10

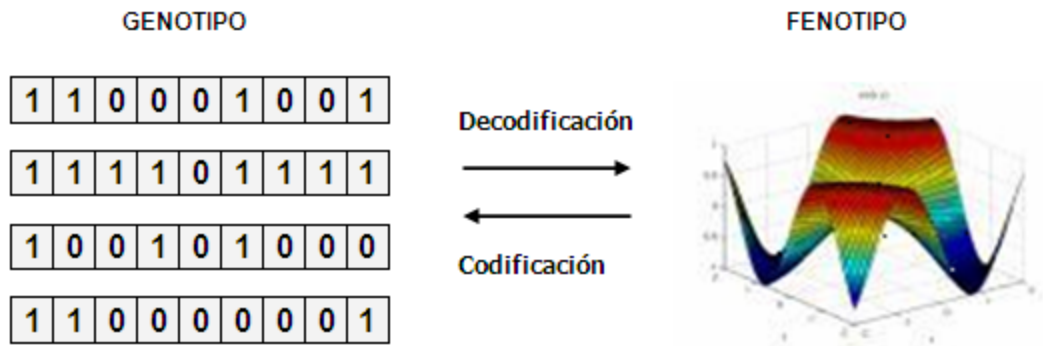


Figura 10 Proceso de Codificación y Decodificación

Ahora, para la parte de evaluación se sigue el siguiente proceso:

```

Evaluar()
{
    Evaluar  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 
    Desde  $n=1$  hasta  $N_{\text{individuos}}$ 
        Calcular aptitud del individuo ( $a_n$ )
        Calcular aptitud total de la población (F)
    Desde  $n=1$  hasta  $N_{\text{individuos}}$ 
        Calcular aptitud relativa del individuo ( $r_n$ )
}

```

Para el proceso de selección existen diferentes métodos, el más conocido es el método de la ruleta, el cual hace una selección proporcional a la aptitud de los individuos. Los mejor evaluados tendrán mayores probabilidades de sobrevivir como se muestra en la Figura 11.

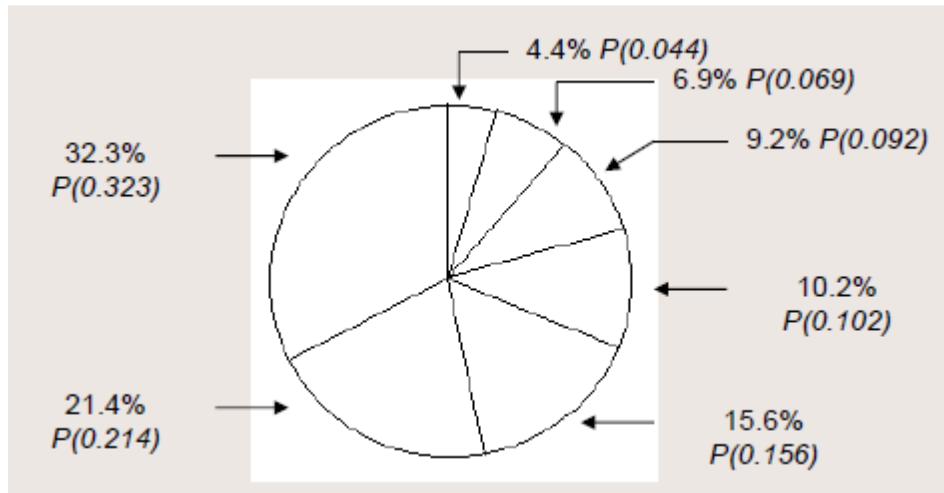


Figura 11 Método de la Ruleta

Por otra parte, en los operadores genéticos, tenemos que éstos alteran la información genética contenida en los individuos de la población para formar una nueva población. Los individuos con valores de aptitud alto tienen una probabilidad mayor de contribuir en la formación de los individuos de la siguiente generación

Por medio de los operadores genéticos se transmite su información de padres a hijos.

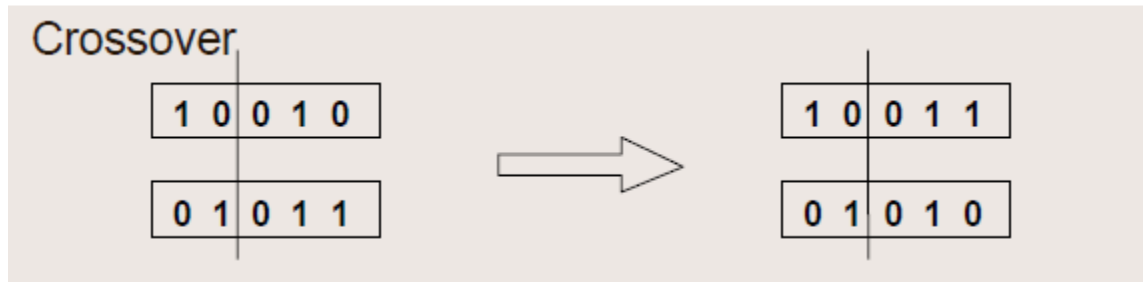
Estos operadores básicos son:

- Cruzamiento
- Mutación

El operador de cruzamiento tiene las siguientes características:

- Es el operador principal en el Algoritmo Genético Simple
- Es un operador sexual
- Genera el intercambio de información entre pares de individuos
- Hereda características de los padres a los hijos.
- Operador típico para cromosomas binarios es el cruzamiento en un solo punto, en el cual dos individuos intercambian una parte de su cromosoma para producir un descendiente. El punto de cruzamiento es seleccionado en forma aleatoria.

Un ejemplo de ello se muestra en la figura 12



*Figura 12 Ejemplo de Cruzamiento*

El operador de cruzamiento permite explotar el espacio de búsqueda al combinar nociones (subcadenas) para formar nuevas ideas (nuevas soluciones)

Sin embargo, aunque la cruza busca y recombina estructuras aptas existentes, se puede perder material genético y estancarse en un óptimo local (convergencia prematura)

Por lo tanto, el operador de mutación es una protección contra esta pérdida prematura de diversidad en la población.

La mutación es un proceso en el cual el alelo de un gen es aleatoriamente reemplazando por otro para producir una nueva estructura y tiene las siguientes características:

- La probabilidad de mutación  $P_m$  en cada gen es pequeña
- La mutación de cada posición es independiente de la acción en otra posición
- En el AGS (Algoritmo Genético Simple), como se tiene representación binaria, la mutación altera el contenido de un gen al cambia 1's por 0's o viceversa
- La mutación es un operador asexual
- El operador de mutación permite introducir diversidad en la población
- Es un operador que explora el espacio de búsqueda

La combinación de los operadores genéticos de cruzamiento y mutación nos proporcionan las siguientes características:

- Explotación
- Exploración

## Capítulo 2. Desarrollo de software energético

Durante los cuatro semestres de maestría desarrollé varios tipos software aplicados al sector energético, desde modelos de optimización, sistemas de inventarios, visualizadores y métodos heurísticos aplicados a la planeación del sistema energético nacional que se describirán a lo largo de esta tesis.

Así mismo, el proyecto principal que guio toda la investigación y el propósito de la maestría es el Modelo de Optimización del Sector Eléctrico denominado Optimizador MC, por sus siglas de los nombres de los desarrolladores (Marco y Cecilia), la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez y un servidor (Marco Antonio Martínez Quintana) respectivamente, que mostraré en el siguiente capítulo.

### **2.1 Generación de planes de expansión energética utilizando programación lineal**

El desarrollo de este software surgió de la necesidad de satisfacer la demanda de años futuros al mínimo costo, cumpliendo las restricciones propuestas, tanto por la capacidad de generación de plantas existentes, los topes de instalación de nuevas plantas, los retiros de plantas existentes, la instalación de plantas comprometidas, las metas de generación de energía mediante energía limpia, etc., para un estudio en el que se proponían metas de generación de energía limpia.

Por lo cual surgen las siguientes preguntas:

- ¿Cómo satisfacer la demanda de años futuros al mínimo costo total de generación?
- ¿Cómo cumplir con las metas de energía limpia?
- ¿Cómo manejar los retiros de plantas existentes sin comprometer la demanda?
- ¿Cómo manejar las adiciones de nuevas plantas de generación en combinación con las que ya existentes?
- ¿Cómo afectan los topes de instalación de nuevas plantas debido a la disponibilidad del recurso?

Para ello se propone realizar un modelo que nos conteste estas interrogantes utilizando programación lineal.

Cabe mencionar que éste es el primer acercamiento al desarrollo de un software de optimización para la generación de planes de expansión energética, dado que sólo considera una modelación uninodal, es decir, toma en cuenta sólo una región de estudio (México) para satisfacer el balance de oferta-demanda.



### 2.1.1 Diseño del modelo de optimización para la generación de planes de expansión energética

El objetivo de este modelo es satisfacer la demanda de años futuros con generación de energía de diferentes tecnologías, sujeta a ciertas restricciones.

Por lo que las variables de decisión del problema son las  $x_i$ , las cuales hacen referencia al monto de capacidad adicional de energía a producir por tipo de tecnología en cada año, como se muestra en la tabla 1. La unidad de medida de las variables de decisión es energía en Megawatts año (MWa). Para convertir este parámetro en una unidad de energía más convencional como lo es los MWh, se tiene que dividir entre 8760 horas que hay en un año, a excepción de los años bisiestos que cuenta con 8784 horas.

Tecnología	Variable de Decisión (Energía en MWa)
Hidroeléctrica	$X_1$
Cogeneración	$X_2$
Turboeléctrica	$X_3$
Ciclo Combinado	$X_4$
Eólica	$X_5$
Solar	$X_6$
Termoeléctrica	$X_7$
Carboeléctrica	$X_8$
Combustión Interna	$X_9$
Bioenergía	$X_{10}$
Nucleoeléctrica	$X_{11}$
Geotérmica	$X_{12}$
Lecho Fluidizado	$X_{13}$
Múltiple	$X_{14}$

*Tabla 1 Variables de Decisión*

El objetivo es optimizar sólo la energía faltante para satisfacer la demanda del año correspondiente. Por ejemplo, si se tiene capacidad instalada suficiente para producir 10,000 MWa y se requieren 12,000 MWa, sólo se requieren optimizar 2,000 MWa y para producirla se tiene que elegir cuál sería la mezcla de tecnología óptima satisfaciendo las restricciones dadas.

Lo que nos da la función objetivo que se muestra a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{14} c_i x_i \quad \text{Eq 2.1}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^{14} x_i = \text{Demanda faltante} \quad \text{Satisfacer la demanda de energía faltante}$$

$$x_i \leq \text{Cap}_i \quad \text{Manejo de topes de instalación}$$

$$\sum_{i=1}^l x_{il} \geq El \quad \text{Cantidad de energía limpia a generar}$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{No negatividad}$$

Como se observa en la restricción de “Cantidad de energía limpia a generar”, se tiene que decir qué tecnologías son limpias y cuáles no lo son para poder cumplir esta restricción, lo cual se muestra en la Tabla 2.

Tecnología	Tipo de Energía
Hidroeléctrica	Limpia
Cogeneración	Limpia
Turboeléctrica	Convencional
Ciclo Combinado	Convencional
Eólica	Limpia
Solar	Limpia
Termoeléctrica	Convencional
Carboeléctrica	Convencional
Combustión Interna	Convencional
Bioenergía	Limpia
Nucleoeléctrica	Limpia
Geotérmica	Limpia
Lecho Fluidizado	Convencional
Múltiple	Convencional

Tabla 2 Tipo de tecnología limpia y convencional

Otro coeficiente importante para poder formular el problema es  $c_i$ , el cual es mostrado en la tabla 3. Este coeficiente es el costo anual que cada tecnología tiene, tomando en cuenta los valores típicos de factor de planta con los que operan, está dado en dólares por unidad de energía, es decir en \$USD/MWa. Este coeficiente considera costos del MWa incluyendo: costos de inversión actualizados al año de inversión, costos de operación y mantenimiento fijos, costos de operación y mantenimiento variables y costos de operación por concepto de combustible.

Tecnología	Costo (\$USD/MWa)
Hidroeléctrica	539,623.26
Cogeneración	455,845.33
Turboeléctrica	930,988.47
Ciclo Combinado	460,971.63
Eólica	447,929.98
Solar	814,297.25
Termoeléctrica	3,234,933.62
Carboeléctrica	1,051,441.45
Combustión Interna	17,412,266.01
Bioenergía	581,507.137
Nucleoeléctrica	583,024.625
Geotérmica	615,909.48
Lecho Fluidizado	749,013.44
Múltiple	4,487,900.91

*Tabla 3 Ejemplo de costos asociados a la producción de energía por tipo de tecnología cuando se habla de MWa anuales  
(Fuente SIMISE)*

Con estos datos se construyó el modelo de programación lineal en una hoja de cálculo como se muestra en la Figura 13.

Este modelo se encuentra en Microsoft Excel y se compone de las siguientes pestañas:

- Principal: Contiene información general del proyecto
- Modelo: Contiene la formulación del modelo utilizando el solver de Excel
- Parámetros: Contiene los parámetros resumidos de las otras pestañas
- Capacidad Instalada: Contiene los datos de capacidad instalada por tipo de tecnología
- Adiciones y Retiros programados: Contienen las adiciones y retiros programados por tipo de tecnología

- Topes de Instalación: Contiene los topes de instalación de capacidad por tipo de tecnología
- Resultados: Contiene los resultados del programa de forma gráfica

Modelo de Programación Lineal (Energía) Marco Antonio Martínez Quintana - Excel

Autoahorrado | Inicio | Insertar | Diseño de página | Fórmulas | Datos | Revisar | Vista | Complementos | Ayuda | Equipo | ¿Qué desea hacer? | Inc. ses. | Compartir

Calibri 11 Fuente Ajustar texto Personalizada Formato condicional Dar formato Estilos de celdas Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Edición

Portapapeles Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas Edición

P20 =SUMAPRODUCTO(B20:O20,B\$21:O\$21)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	Modelo de Programación Lineal para la Generación de Planes de Expansión Energética																	
2																		
3	<b>Modelo</b>	<b>Hidroeléctri</b>	<b>Cogenerac</b>	<b>Turboeléctri</b>	<b>Ciclo Combin.</b>	<b>Eólica</b>	<b>Solar</b>	<b>Termoeléctri</b>	<b>Carboeléctri</b>	<b>Combustión Inte</b>	<b>Bioenerg</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Geotérmia</b>	<b>Lecho Fluidiz</b>	<b>Múltiple</b>	<b>Total</b>	<b>Requerimiento</b>	
4	<b>Demanda Faltante</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10.320	=	10.320
5	<b>Tope de instalación Hidroeléctri</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.200	<=	1.200
6	<b>Tope de instalación Cogeneraci</b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	<=	800
7	<b>Tope de instalación Turboeléctri</b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<=	500
8	<b>Tope de instalación Ciclo Combi</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	632	<=	1.300
9	<b>Tope de instalación Eólica</b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.000	<=	3.000
10	<b>Tope de instalación Solar</b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<=	7.000
11	<b>Tope de instalación Termoeléctri</b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	<=	500
12	<b>Tope de instalación Carboeléctri</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	<=	200
13	<b>Tope de instalación Combustión</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	<=	1.000
14	<b>Tope de instalación Bioenergía</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	<=	5.800
15	<b>Tope de instalación Nuclear</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	<=	800
16	<b>Tope de instalación Geotérmica</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	<=	200
17	<b>Tope de instalación Lecho Fluid</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	<=	100
18	<b>Tope de instalación Múltiple</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	<=	3.628
19	<b>Meta de energía Limpia</b>	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	>=	3.628
20	<b>Costo Unitario</b>	539.623,26	455.845,33	330.986,47	450.971,63	*****	*****	3.234.333,62	1.051.441,45	17.412.266,01	*****	*****	*****	749.013,44	*****	5.371.676,335	U.M.	
21	<b>Solución</b>	6200	800	0	632.4953171	3000	0	0	0	0	1000	3627.954	0	0	0			

Principal | **Modelo** | Parámetros | Capacidad Instalada | Adiciones y Retiros Programados | Toj ... | 70%

Figura 13 Modelo de Optimización en Microsoft Excel para la Generación de Planes de Expansión Energética

## 2.2 Generación de un Plan de Suministro de Agua para una Central Hidroeléctrica de Rebombeo con el Enfoque de Inventarios



*Figura 14 Imagen representativa del acuerdo de París*

Este segundo software surge cuando en la materia de Energía y Ambiente conocí las INDC's que dicen que a nivel mundial se busca que la temperatura del planeta no rebase el aumento de 2°C, por lo cual todos y cada uno de los países se pusieron de acuerdo para lograr esta meta y firmaron el acuerdo de París, el cual busca que los países tanto desarrollados como en vías de desarrollo disminuyan sus emisiones de gases de efecto invernadero, ya que de no hacerlo, las temperaturas atmosféricas seguirán aumentando y podrían pasar el umbral de los 2 grados centígrados. Esto significa que el planeta será más caliente, que los niveles del mar incrementarán, las tormentas e inundaciones serán más fuertes, al igual que las sequías y que habrá escasez alimentaria y más condiciones extremas.

Por ello, México al firmar el acuerdo de París se comprometió a tomar medidas que contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero, estas medidas son las Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional (INDC por sus siglas en inglés), las cuales constituyen los esfuerzos de los países que son parte de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Una de las principales medidas que se tomaron en México y en otros países para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero es incluir en el mix de generación de electricidad a las energías limpias, como lo es la energía solar, la energía eólica, la hidroeléctrica, entre otras.

De aquí nace la idea de crear un plan de suministro de agua para las plantas hidroeléctricas que cuentan con sistemas de bombeo o rebombeo, a través del enfoque de inventarios (materia cursada el mismo semestre). Es decir, calcular cuál sería la cantidad óptima a tener en inventario (almacenada), para una generación de electricidad limpia y con esto contribuir a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, además de saber cada cuándo solicitar el llenado del contenedor superior para tener un costo total variable mínimo tomando en cuenta diferentes factores.

### 2.2.1 Planta hidroeléctrica con bombeo o rebombeo

Una planta hidroeléctrica con bombeo o rebombeo funciona de la siguiente manera, como se muestra en la Figura 15.



Figura 154 Partes de una central hidroeléctrica con rebombeo

### 2.2.2 Funcionamiento<sup>5</sup>

Una central hidroeléctrica de bombeo es un tipo especial de central hidroeléctrica que tiene dos embalses. El agua contenida en el embalse situado en el nivel más bajo —embalse inferior—, es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica al depósito situado en la cota más alta —embalse superior—, con el fin de turbinarla, posteriormente, para generar electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico.

Por tanto, estas instalaciones permiten una mejora en la eficiencia económica de la explotación del sistema eléctrico al almacenar electricidad en forma de agua embalsada en el depósito superior. Constituye en la actualidad una forma económica de almacenar energía eléctrica.

<sup>5</sup> UNESA, "Central Hidroeléctrica de Bombeo", Consultado en mayo del 2018 en: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1342-central-bombeo>

Las centrales que no tienen aportaciones de agua significativas en el embalse superior se llaman centrales de bombeo puro. En otro caso, se denominan centrales mixtas de bombeo.

Un esquema del funcionamiento de una central de bombeo puro es el siguiente:

1. Durante las horas en que la demanda de energía eléctrica es mayor, la central de bombeo funciona como cualquier central hidroeléctrica convencional: el agua que previamente es acumulada en el embalse superior (1) cerrado por una presa (2), llega a través de una galería de conducción (3) a una tubería forzada (5), que la conduce hasta la sala de máquinas de la central eléctrica. Para la regulación de las presiones del agua entre las conducciones anteriores se construye en ocasiones una chimenea de equilibrio (4).
2. En la tubería forzada, el agua va adquiriendo energía cinética (velocidad) que, al chocar contra los álabes de la turbina hidráulica (6), se convierte en energía mecánica rotatoria. Esta energía se transmite al generador (7) para su transformación en electricidad de media tensión y alta intensidad. Una vez elevada su tensión en los transformadores (8) es enviada a la red general mediante líneas de transporte de alta tensión (10). El agua, una vez que ha generado la electricidad, circula por el canal de desagüe (9) hasta el embalse inferior (11), donde queda almacenada.
3. Cuando se registra un menor consumo de energía eléctrica —generalmente durante las horas nocturnas de los días laborables y los fines de semana—, se aprovecha el que la electricidad en esas horas tiene en el mercado un costo bajo, y se utiliza para accionar una bomba hidráulica que eleva el agua desde el embalse inferior (11) hasta el embalse superior (1), a través de la tubería forzada y de la galería de conducción.
4. El agua es elevada, generalmente por las propias turbinas de la central, funcionando como bombas accionadas por los generadores que actúan como motores. Una vez efectuada la operación de bombeo, el agua almacenada en el embalse superior (1) está en condiciones de repetir otra vez el ciclo de generación eléctrica.

### 2.2.3 Desarrollo del modelo

Una vez que se describieron los objetivos del estudio, los cuales son crear planes de suministro de agua para las plantas hidroeléctricas que cuentan con sistemas de bombeo o rebombeo, a través del enfoque de inventarios, podemos plantear las siguientes preguntas:

- ✚ ¿Cuál es la cantidad óptima a suministrar en el embalse superior de la planta hidroeléctrica con rebombeo para satisfacer la demanda, teniendo un inventario bajo?
- ✚ ¿Cada cuándo se debe suministrar el agua al embalse superior?
- ✚ ¿Cuál es el costo total variable de esta política?

Para este estudio se propone construir una central hidroeléctrica con rebombeo como parte de la central hidroeléctrica Manuel Moreno Torres, también llamada Chicoasén, ubicada en el estado de Chiapas, la cual cuenta con una capacidad instalada de 2400 [MW] de energía limpia.

La central hidroeléctrica con rebombeo se propone que tenga un depósito superior de 100 [Hm<sup>3</sup>], y cuente con una demanda 6 [Hm<sup>3</sup>] diarios, los cuales los obtendría del depósito inferior que es la presa de Chicoasén, la cual cuenta con 1,376 [Hm<sup>3</sup>].

El costo por suministrar agua del depósito inferior al superior es de \$550 por hectómetro cúbico, mientras que el costo por mantener es de \$250 por hectómetro cúbico (datos sólo para el estudio y pruebas del modelo).

Para dar respuesta a las preguntas anteriores obtenemos los datos del enunciado.

$$\text{Demanda anual (D)} = 6 [\text{Hm}^3] \times 365 \text{ días} = 2,190 [\text{Hm}^3] \text{ al año}$$

$$\text{Costo por ordenar (k)} = \$550^6$$

$$\text{Costo por mantener (h)} = \$250^7$$

Ahora aplicando el modelo de lote económico (EOQ) mencionado en el Marco Teórico de esta tesis, tenemos que para obtener la cantidad óptima a ordenar calculamos:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2kD}{h}}$$

Y sustituyendo los valores en la ecuación tenemos:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 * (550) * (2,190)}{250}}$$

Lo que nos da por resultado:

$$Q^* = 98.166 [\text{Hm}^3]$$

***Lo que nos indica que la cantidad óptima a suministrar al depósito superior es 98.166 [Hm<sup>3</sup>]***

---

<sup>6</sup> Se toma en consideración el llenado del depósito superior desde el depósito inferior

<sup>7</sup> Se consideran gastos de mantenimiento y de los trabajadores.



Y ahora para saber cuántas órdenes y cada cuando solicitar el suministro de agua utilizamos las siguientes expresiones:

$$\text{Número de pedidos} = \frac{\text{Demanda}}{Q^*}$$

$$\text{Cada cuándo pedir} = \frac{Q^*}{\text{Demanda}}$$

Sustituyendo los resultados obtenidos de la cantidad óptima a ordenar, tenemos

$$\text{Número de pedidos} = \frac{2,190}{98.166}$$

$$\text{Número de pedidos} = 22.309$$

$$\text{Cada cuando pedir} = \frac{98.166}{2,190}$$

$$\text{Cada cuando pedir} = 0.0448 \text{ de año}$$

**Por lo que necesitamos hacer 23 suministros de agua al depósito superior cada 0.0448 años, es decir cada 17 días, como se muestra en la siguiente gráfica.**

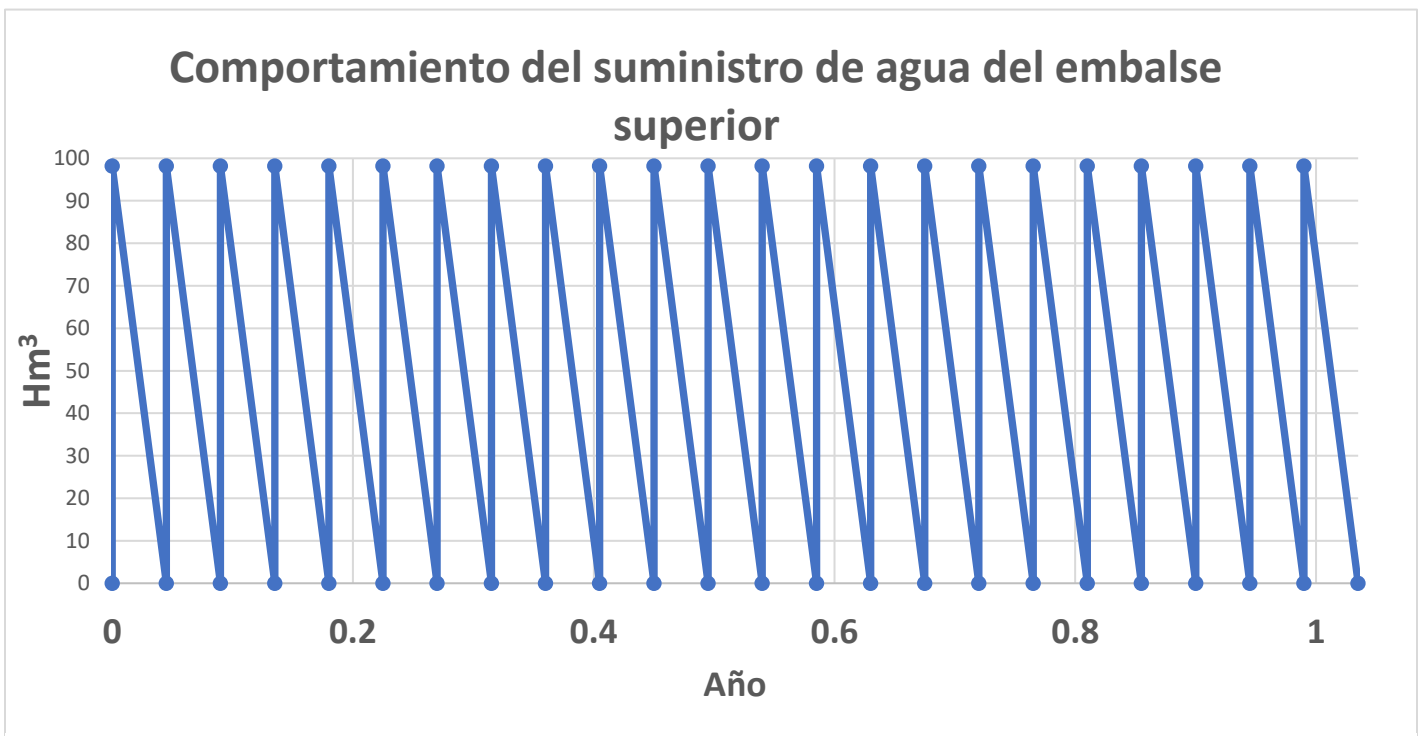


Figura 16 Comportamiento del suministro de agua al embalse superior

Lo que nos da un costo total variable de:

$$CTV(Q^*) = k \frac{D}{Q^*} + h \frac{Q^*}{2}$$

Sustituyendo los valores correspondientes tenemos:

$$CTV(Q^*) = 550 * \frac{2190}{99} + 250 * \frac{99}{2}$$

$$CTV(Q^*) = \$ 24,541.66$$

Esto nos indica que tendremos un costo total variable de \$ 24,541.66 al año.

### 2.2.3 Nivel de Servicio

Por último, si se tiene la siguiente distribución de la demanda en el plazo de entrega y tomando en cuenta que el depósito superior es de 100 [Hm<sup>3</sup>].

Demanda en el plazo de entrega	Probabilidad
0.3 [Hm <sup>3</sup> ]	0.5
0.5 [Hm <sup>3</sup> ]	0.3
1 [Hm <sup>3</sup> ]	0.1
1.5 [Hm <sup>3</sup> ]	0.1

*Tabla 4 Distribución de la demanda de agua*

Tenemos que la demanda esperada durante un plazo de entrega es de:

$$0.3 * 0.5 + 0.5 * 0.3 + 1 * 0.1 + 1.5 * 0.1 = 0.55 [Hm^3]$$

Por lo que si el punto de reorden es cuando se tiene 1 [Hm<sup>3</sup>] en el depósito superior, se presentará déficit cuando exista demanda de 1.5 [Hm<sup>3</sup>], es decir, la cantidad esperada de unidades faltantes por ciclo es:

$$0.3 * 0 + 0.5 * 0 + 1 * 0 + 1.5 * 0.1 = 0.15$$

Y dado que se tienen 23 suministros de agua al año, el promedio de faltantes en el periodo es de:

$$23 * 0.15 = 3.45 \text{ [Hm}^3\text{]}$$

De donde:

$$2190 - 3.45 = 2186.55 \text{ [Hm}^3\text{]}$$

Es la cantidad de unidades cumplidas a tiempo, cada año.

Por lo que:

$$\frac{2186.55}{2190} = 0.99$$

Esto es, se cumple la demanda de agua hacia el depósito superior en un 99%.

Y el número de ciclos en el que se tendrá déficit se calcula de la siguiente manera:

$$23 * 0.1 = 2.3 \text{ suministros}$$

Lo que nos indica que en promedio *habrá déficit en 2 o 3 suministros de agua* hacia el depósito superior.

### **2.3 Algoritmo Genético para la generación de planes de Expansión Energética**

Este tercer software lo realicé para observar cómo se comporta la generación de planes de expansión energética utilizando métodos heurísticos, específicamente el uso de algoritmos genéticos, los cuales se describen a detalle en el marco teórico de esta tesis.

El objetivo de este algoritmo genético es también satisfacer la demanda de años futuros al mínimo costo con la participación óptima de diferentes tecnologías de generación eléctrica, cumpliendo las restricciones propuestas, tanto por la capacidad de generación de plantas existentes, los topes de instalación de nuevas plantas, los retiros de plantas existentes, la instalación de plantas comprometidas, las metas de generación de energía mediante energía limpia, etc.

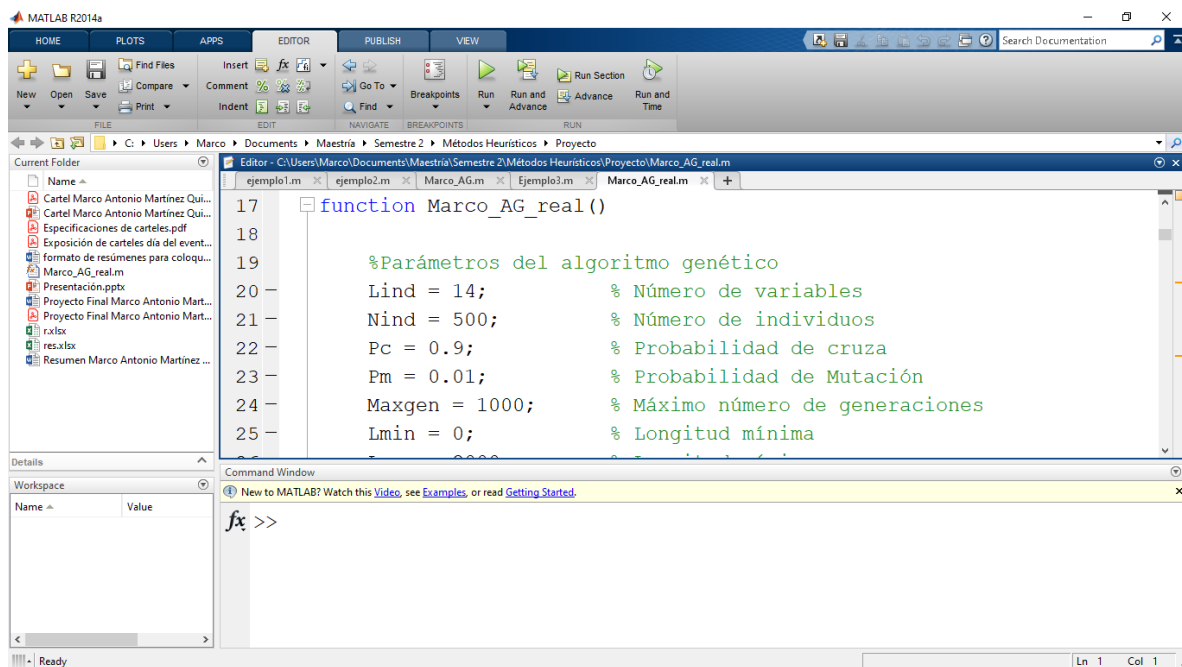
Por lo cual surgen las siguientes preguntas:

- ¿Cómo satisfacer la demanda de años futuros al mínimo costo?
- ¿Cómo cumplir con las metas de energía limpia?
- ¿Cómo manejar los retiros de plantas existentes sin comprometer la demanda?
- ¿Cómo manejar las adiciones de nuevas plantas de generación en combinación con las que ya existen?

- ¿Cómo afectan los topes de instalación de nuevas plantas debido a la disponibilidad del recurso energético empleado?

Para ello se propone realizar un algoritmo genético con codificación real que nos conteste estas interrogantes.

Cabe mencionar que este es mi primer acercamiento al desarrollo de un software de optimización para la generación de planes de expansión energética utilizando métodos heurísticos, específicamente el uso de un algoritmo genético programado desde cero en Matlab.



*Figura 17 Algoritmo genético para la generación de planes de expansión energética desarrollado en Matlab*

### 2.3.1 Diseño del algoritmo genético para la generación de planes de expansión energética

El objetivo de dicho algoritmo es satisfacer la demanda de años futuros sujeto a ciertas restricciones. El problema a resolver es el mismo que el descrito en la sección 2.1.1 pero aplicando algoritmos genéticos.

El código correspondiente al algoritmo genético lo puede solicitar al autor de la tesis enviando un correo electrónico a la dirección: [ing.marco.mtz1991@gmail.com](mailto:ing.marco.mtz1991@gmail.com).



## Capítulo 3 Modelo de optimización del sector eléctrico MC

Como se mostró al inicio del capítulo anterior, el software guía de toda la maestría es realizar este modelo de optimización, el cual busca satisfacer la demanda de energía de años futuros, pero a diferencia del modelo de programación lineal mostrado en la sección 2.1 y el algoritmo genético mostrado en la sección 2.3, el modelo de optimización del sector eléctrico MC tiene los siguientes objetivos:

- Buscar la nueva adición de infraestructura para satisfacer la demanda de energía de cada año.
- Realizar el despacho horario óptimo por región utilizando los enlaces de transmisión entre regiones.
- Agregar de manera dinámica tecnologías, regiones y enlaces de transmisión entre las mismas.
- Tener la flexibilidad de elección del número de años a optimizar.
- Limitar la adición de infraestructura de cada tecnología tomando en cuenta la región en la que se pretende instalar.
- Agregar adiciones de capacidad exógenas (adiciones fijas) y retiros de capacidad exógenos (retiros fijos) durante el horizonte de planeación a optimizar.
- Limitar la capacidad de los enlaces de transmisión entre regiones.
- Agregar metas de generación de energía limpia a los escenarios propuestos.

Por simplificación del sistema eléctrico nacional se consideran 9 regiones y 10 enlaces de transmisión. Así también, las 8760 horas (8784 horas para años bisiestos) son representadas por 260 horas con diferente duración de tiempo conservando el total de horas al año.

El tamaño de la función objetivo y las matrices ya no pueden ser cargadas utilizando el solver de Excel, ya que la generación de matrices se hace de forma dinámica, por lo cual realicé un software en Matlab que nos ayuda a la construcción del modelo que se muestra a continuación.

La función objetivo a resolver se muestra a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I c_{r,t,i} x_{r,t,i}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{r,t,i} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I Demanda_{r,i} \quad \text{Satisfacer la demanda horaria por región}$$

$$x_{r,t,i} \leq fd_{r,t,i} * Cap_{r,t} \quad \text{Manejo de topes de generación}$$

$$x_{r,t,i} \leq fd_{r,t,i} * TC_{r,t} \quad \text{Manejo de topes de instalación de capacidad}$$

$$\sum_{r=et}^R \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{r,t,i} \leq TET \quad \text{Manejo de topes de enlaces de transmisión}$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{t=el}^T x_{r,t} \geq \%El \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T x_{r,t} \quad \text{Manejo del \% de energía limpia}$$

$$x_{r,t} \geq 0 \quad \text{No negatividad}$$

Donde:

$Z$  es el costo anual total de la optimización en millones de dólares

$c_{r,t,i}$  es el costo de despacho de energía o costo de instalación de nueva capacidad o costo de transmisión de energía por tecnología en cada región dependiendo de la variable de decisión que lo esté multiplicando

$x_{r,t,i}$  es la energía despachada o la capacidad instalada o la energía transmitida por tecnología en cada región cada hora

$Demanda_{i,r}$  es la demanda en cada región por hora

$fd_{r,t}$  es el factor de disponibilidad de cada tecnología en cada región cada hora

$Cap_{r,t}$  es la capacidad de cada tecnología en cada región

$TC_{r,t}$  es el tope de adición de capacidad de cada tecnología en cada región

$TET$  es el tope de capacidad del enlace de transmisión entre regiones

$\%El$  es el porcentaje de energía limpia

Una vez planteado el modelo de optimización, se propuso desarrollar una metodología de manejo de datos que nos ayude a generar las matrices de una forma sencilla y entendible.

La metodología que se propone es usar una matriz binaria, la cual nos indica qué tecnología hay en cada región y así poder encontrar las variables de decisión asociadas como se muestra en la Figura 18 con lo que se obtiene la dimensión de la función objetivo.

	Región	Tipo	Origen	Demanda	Hidroeléctrica	Cogeneración	Turbogas	Ciclo Combinado	Eólica	Solar	Termoelectrica	Carboeléctrica	Combustión Interna	Bioenergía	Nucleoelectrica	Geotérmica	Small Hidro	Lecho Fluidizado	Nuevas Tec
1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
2	2	2	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	1	3	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
4	4	2	3	2	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
5	5	1	5	3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
6	6	2	5	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
7	7	1	7	4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
8	8	2	7	4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
9	9	1	9	5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
10	10	2	9	5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
11	11	1	11	6	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
12	12	2	11	6	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
13	13	1	13	7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
14	14	2	13	7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
15	15	1	15	8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
16	16	2	15	8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
17	17	1	17	9	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
18	18	2	17	9	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
19	19	3	13	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
20	20	3	15	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
21	21	3	13	8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
22	22	3	7	8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
23	23	3	15	9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
24	24	3	7	7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
25	25	3	11	7	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
26	26	3	9	7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
27	27	3	11	5	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
28	28	3	7	6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1

Figura 185 Hoja de configuración de tecnologías por región

Como se puede apreciar en la Figura 18 se tienen columnas y renglones con un número que identifica:

- Región: lista consecutiva de identificadores de regiones (1 a 28, según la descripción de la figura 25. En el ejemplo se consideran 9 regiones de operación, 9 regiones de instalación y 10 regiones de transmisión )
- Tipo de región
  - Despacho: 1
  - Instalación: 2
  - Transmisión: 3
- Origen: Región origen de producción de energía
- Destino: Región destino de producción de energía
- Tecnología de producción de energía (En el ejemplo se muestran 14 identificadores de tecnologías)



- Tipo de tecnología de producción
  - Limpia: 1
  - Convencional: 0

Estos números o identificadores se agregan en la hoja Catálogo como se muestra en la Figura 19.

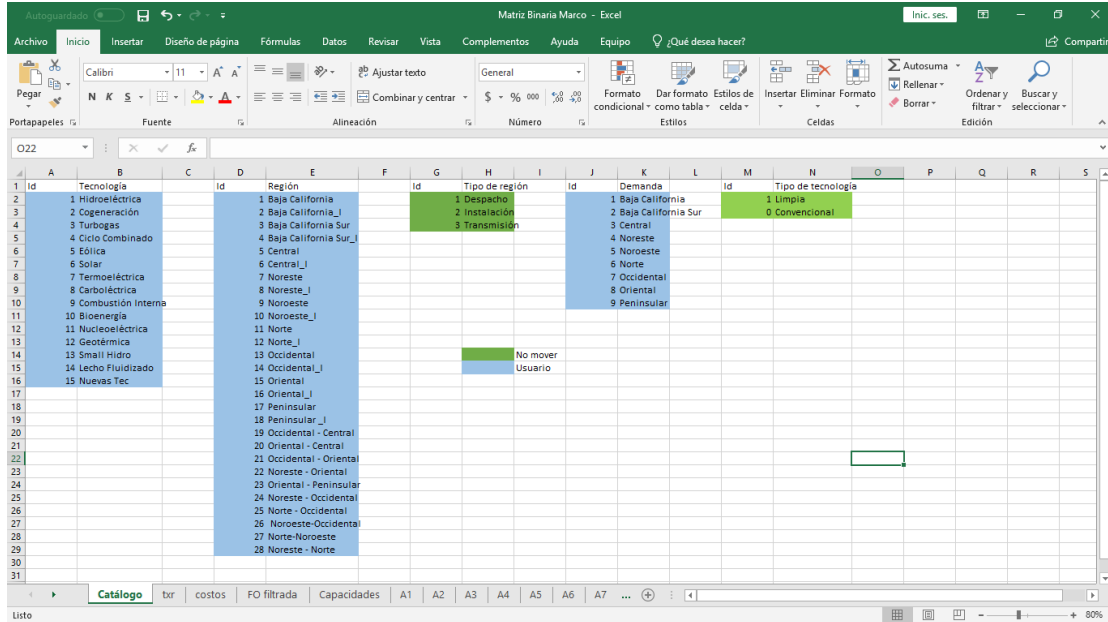


Figura 19 Hoja de Catálogo con identificadores para el optimizador MC

Otra hoja importante que llenar es la hoja de Costos, los cuales van a ser los coeficientes de costo de la función objetivo, pero filtrados según nuestra hoja de configuración binaria explicada anteriormente.

Esta hoja tiene las mismas características que la hoja de configuración como se muestra en la figura 20, pero los datos que se ingresan aquí son de costos.



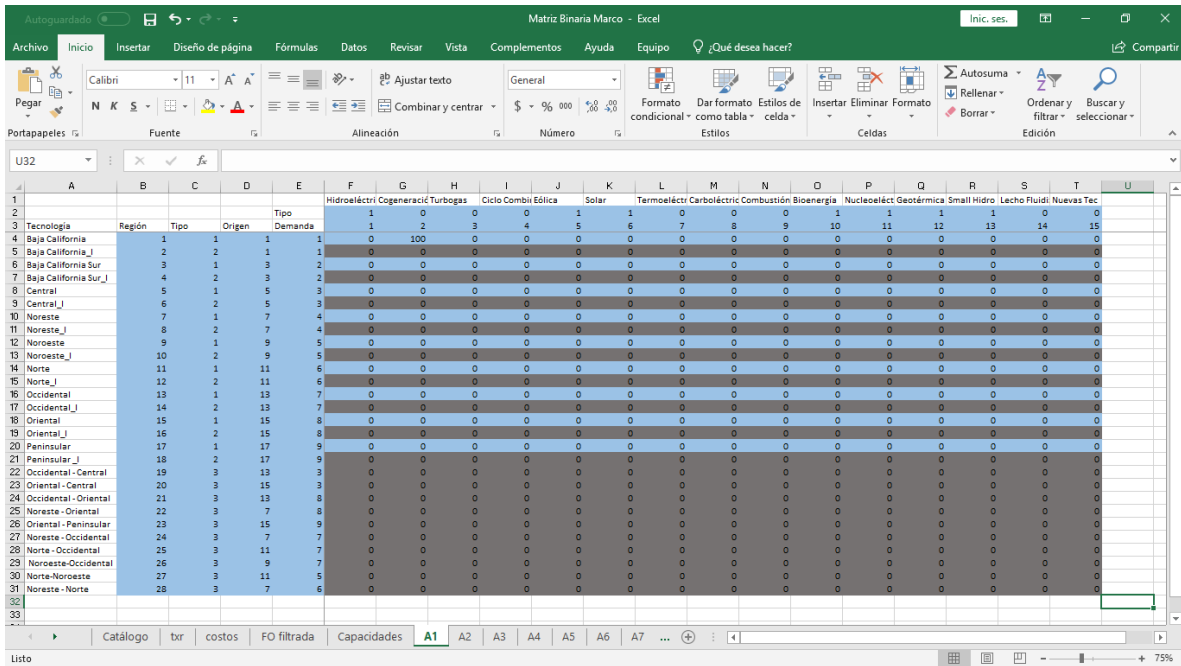


Figura 22 Hoja de Adiciones Fijas del año 1

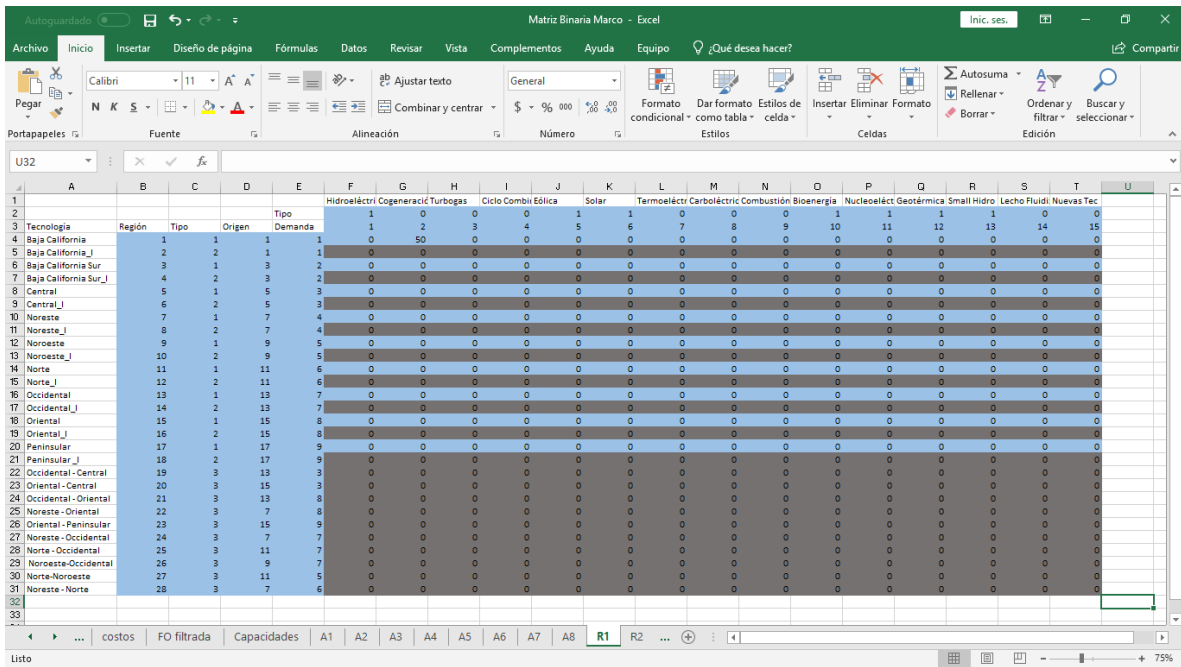


Figura 73 Hoja de retiros fijos del año 1

Una vez llenadas las hojas de adiciones y retiros fijos de cada año se procede a llenar el factor de disponibilidad de cada tecnología en cada región como se muestra en la figura 24.

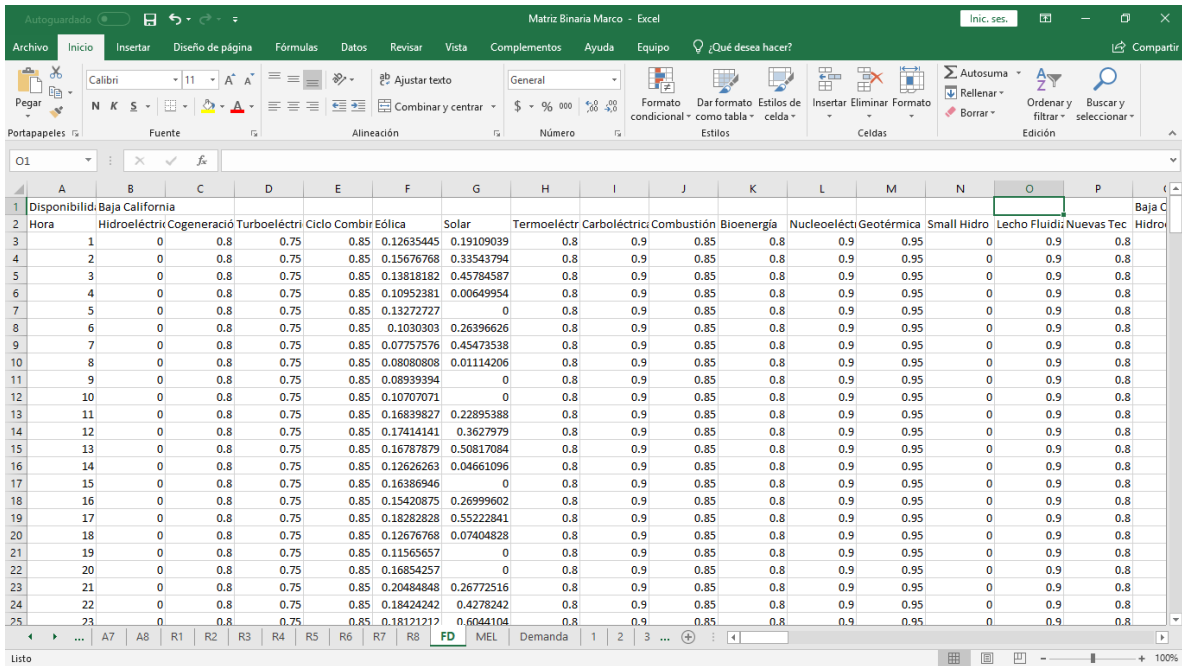


Figura 24 Hoja de factor de disponibilidad de tecnologías por región en cada hora para todas las horas

Para la restricción de metas de energía limpia se llena la hoja "MEL" como se muestra en la Figura 25, en donde se pone de 0 a 1 la fracción de energía limpia que se quiere tener en cada año.

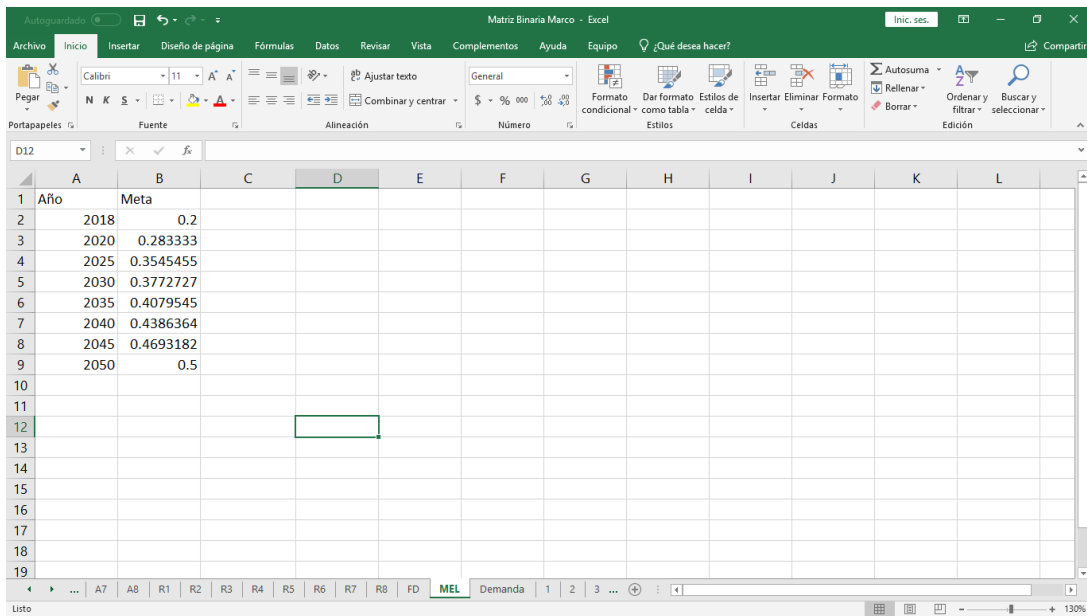


Figura 25 Hoja de metas de energía limpia

Ahora, después de llenar las hojas anteriores procedemos a llenar las demandas horarias de cada año por región como se muestra en la Figura 26.

Nombre	Id	Demanda 1	Demanda 2	Demanda 3	Demanda 4	Demanda 5	Demanda 6	Demanda 7	Demanda 8	Demanda 9	Demanda 10	Demanda 11
Baja Californ	1	1353.5885	1409.1234	1499.4774	1571.8892	1653.0232	1144.5523	1262.7398	1322.1185	1398.2756	1269.2108	1317.221
Baja Californ	2	264.9313	256.18484	239.9412	223.22766	216.06588	246.60752	225.38681	205.97599	200.65303	274.19046	271.88687
Central	3	7275.9591	6873.6579	6693.2915	6299.6992	6386.6279	6393.5598	5897.3846	5656.3992	5812.9192	7786.3598	7328.9184
Noreste	4	6198.559	6008.0448	5919.9352	5959.7495	6101.6492	5473.4709	5195.3685	5371.674	5565.9176	6350.8454	6222.7281
Noroeste	5	2339.0029	2292.748	2179.5705	2115.8602	2099.4033	2176.7876	2031.6126	1962.8506	1975.1423	2394.1873	2342.5309
Norte	6	2622.661	2457.4724	2414.4452	2404.2615	2382.0286	2225.2517	2050.7453	2058.5429	2056.8463	2690.8402	2619.2863
Occidental	7	7501.1555	7109.0302	6924.9804	6858.1651	6994.6456	6718.364	6168.9951	6350.0037	6545.1177	7985.0377	7401.1367
Oriental	8	5758.7039	5641.4034	5489.2529	4936.1494	4938.6852	5685.9682	5388.1847	4932.101	4925.0384	5894.3387	5837.5863
Peninsular	9	1305.1712	1203.1598	1174.1335	1106.9586	1172.1194	1092.3328	955.22452	916.04143	983.53698	1343.0952	1332.4367

Figura 86 Hoja de demanda del año 1

Y por último se llena la hoja de capacidad de cada enlace de transmisión como se muestra en la figura 27.

Enlace	Id de región	Capacidad
Occidental - Central	19	4100
Oriental - Central	20	7000
Occidental - Oriental	21	350
Noreste - Oriental	22	1450
Oriental - Peninsular	23	1150
Noreste - Occidental	24	4400
Norte - Occidental	25	300
Noroeste-Occidental	26	1380
Norte-Noroeste	27	920
Noreste - Norte	28	1050

Figura 279 Hoja de capacidad de enlaces de transmisión

Una vez llenados estos datos se procede a la optimización abriendo Matlab y corriendo el “optimizador\_mc.m” como se muestra en la Figura 28.

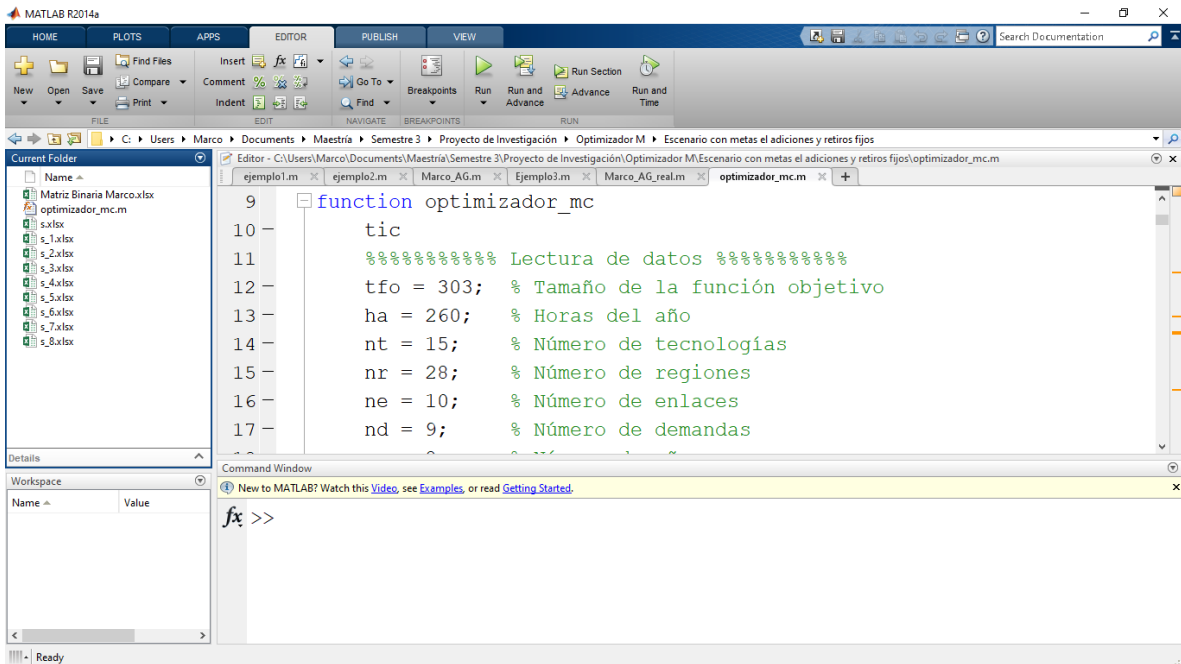


Figura 28 Optimizador MC en Matlab

El código completo del optimizador se puede solicitar al autor de esta tesis enviando un correo electrónico a la dirección: [ing.marco.mtz1991@gmail.com](mailto:ing.marco.mtz1991@gmail.com).



## Capítulo 4. Resultados

Como resultado de la tesis se obtuvo la respuesta a las preguntas de investigación y se cubrieron los objetivos planteados al inicio de la misma con el desarrollo del modelo de optimización del sector eléctrico regional llamado optimizador mc, el cual puede realizar además de la propuesta de adición de infraestructura necesaria para satisfacer la demanda de energía de años futuros, el despacho horario de cada región satisfaciendo las restricciones de topes de generación, disponibilidad de tecnologías, porcentajes de generación de energía limpia, topes de los enlaces de transmisión, adiciones y retiros fijos anuales, no negatividad y topes de adición de infraestructura.

Una vez terminada la optimización, el programa nos da como resultado un archivo de Microsoft Excel con los resultados de adiciones de capacidad mostrados en la Figura 29 en la hoja c, la cual nos indica la capacidad con la que inició el año en la columna C y como terminó el año con las adiciones de capacidad propuestas por el modelo de optimización, más las adiciones fijas menos los retiros fijos.

Región	Tecnología	68.16	68.16
BCN	Cog	68.16	68.16
BCN	Tur	462.0225	462.0225
BCN	CC	2483.1645	2483.1645
BCN	Eol	17.7737374	17.7737374
BCN	Sol	0	709.937092
BCN	Ter	256	256
BCN	Cin	15.78875	15.78875
BCN	Geo	541.5	541.5
BCN	SHid	0	0
BCN	NT	0	0
BCN_I	Cog	1000	1000
BCN_I	Tur	1000	1000
BCN_I	CC	1000	1000
BCN_I	Eol	10000	10000
BCN_I	Sol	10000	10000
BCN_I	Ter	10000	10000
BCN_I	Cin	10000	10000
BCN_I	Geo	10000	10000
BCN_I	SHid	10000	10000
BCN_I	NT	10000	10000
BCS	Tur	299.16	299.16
BCS	Sol	0	405.726922
BCS	Ter	126.8	126.8
BCS	Cin	356.59455	356.59455

Figura 2910 Resultados del optimizador - adiciones de Energía





Región	Tecnología	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14
BCN	Cog	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN	Tur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN	CC	789.959434	839.573939	932.273872	1012.16894	1004.75858	584.354942	0	767.137067	841.936238	0	746.383971	805.017908	1442.03665	1483.26867
BCN	Eol	20.9748393	26.0234343	22.9381818	18.1809524	22.0327273	17.1030303	12.8775758	13.4141414	14.8393939	17.7737374	27.9541126	28.9074747	27.8678788	20.959596
BCN	Sol	1.15418594	2.02604519	2.76538904	0.0392572	0	1.59435624	2.74660167	0.06729805	0	0	1.38288146	2.19129929	3.0693519	0.28153018
BCN	Ter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN	Cin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN	Geo	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	541.5	0	0
BCN	SHid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN	NT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Cog	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Tur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	CC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Eol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Sol	0	0	0	0	84.7319314	0	705.615607	0	709.937092	0	0	0	0	0
BCN_I	Ter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Cin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	Geo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	SHid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCN_I	NT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCS	Tur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	232.023822	235.804652
BCS	Sol	5.10958451	16.4201448	15.6800283	0	0	6.37051464	13.5313975	0	0	0	6.34197356	18.0369846	17.8740321	0
BCS	Ter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCS	Cin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 31 Salidas del Optimizador MC sin procesar

Con lo anterior el tomador de decisiones puede armar escenarios para analizar el sistema eléctrico, con el fin de tomar la mejor decisión.

Otra de las ventajas del modelo realizado es la versatilidad que maneja al agregar nuevas regiones y tecnologías de manera dinámica, gracias a su modelo de configuración binaria que inventé, el cual hace que la función objetivo se ajuste al número de variables de decisión exactas y no tenga que procesar más información de la requerida.

Por otro lado, también gracias al modelo de optimización que se estuvo desarrollando durante la maestría, desarrollé otras herramientas que ayudan a la planeación energética como el modelo de Generación de un Plan de Suministro de Agua para una Central Hidroeléctrica de Rebombear con el Enfoque de Inventarios, con el cual podemos incrustar en la matriz de generación de energía un mayor porcentaje de energía limpia disponible gracias al sistema de rebombear.

Otro de los software que ayudaron a calibrar el modelo de optimización es el algoritmo genético para la generación de planes de expansión energética, el cual ayudo mucho, ya que con él logramos encontrar planes de expansión cercanos al óptimo que proponían otra configuración de tecnologías para satisfacer la demanda, pero cumpliendo siempre las restricciones dadas.

Por último, también desarrollé un modelo de optimización para ser usado en Microsoft Excel el cual nos ayuda a encontrar un plan de expansión uninodal de infraestructura para satisfacer la demanda de un escenario dado, éste fue perfeccionado por la Dra. Cecilia Martín del Campo y ahora es utilizado en la asignatura Análisis de Expansión del Sector Eléctrico para hacer análisis de sistemas eléctricos en el que se quieren crear planes de expansión a largo plazo.

## Capítulo 5. Conclusiones

Gracias a esta tesis comprendí lo importante que es hacer una maestría, ya que con ella profundizas más y más en el ámbito que te gusta (la energía) y como es mi caso pude aplicar también mis conocimientos sólidos de computación a problemas de energía y medio ambiente, específicamente, planeación energética y con ello automatizar y optimizar procesos que si se hicieran a mano serían muy tardados y a veces difíciles de visualizar.

Por otro lado, veo que la combinación de Ingeniería en Computación y Maestría en Ingeniería en Energía es un combinación muy buena, ya que como Maestro en Ingeniería en Energía conozco todas las actividades que conlleva la planeación energética para crear planes de expansión óptimos que contemplen todas las características del país, así como de su interacción con el mundo, esto es poder visualizar cada actividad tomando en cuenta restricciones reales como las metas de energía limpia, los acuerdos de París, las redes de transmisión existentes, los precios de los combustibles, la creciente demanda de energía, el desarrollo de nueva tecnología, entre otros y así poder construir mejores modelos que nos acerquen a la realidad y con ello brindar a los tomadores de decisiones como SENER, CFE, INECC, entre otros, a tomar mejores decisiones, ya que contarán con herramientas de calidad que les ayuden a modelar mejor sus escenarios y poder hacer análisis más minuciosos.

Para terminar, me gustaría decir que México está listo para ponerse a la vanguardia de la tecnología y desarrollar sus propios modelos y no sólo de planeación energética, sino de cualquier ámbito, ya que en la UNAM contamos con excelentes profesores que nos pueden guiar para desarrollar tecnología 100% mexicana y que pueda competir de manera internacional.

De mi experiencia con personas de otros países, veo que tenemos la misma capacidad e incluso a veces más, para poder desarrollar cualquier actividad, como modelado, análisis, diseño, desarrollo, solución de problemas, entre otras, dado que el ingenio mexicano es muy bueno a la hora de solucionar problemas con las herramientas que se tienen al alcance.

Uno de los casos de éxito de los que formo parte y estoy orgulloso, es el desarrollo del Sistema de Modelación Integral del Sector Energético SIMISE, el cual es una plataforma de modelos 100% mexicana que desarrolló la UNAM a la SENER para realizar actividades de planeación energética y que gracias a ese proyecto se reunieron a los mejores investigadores de diferentes instituciones mexicanas de la UNAM, para poder realizarla y que fue bien valorada desde otras partes del mundo, formando ahora lo que conocemos como la Unidad de Planeación Energética de la UNAM (UPE-UNAM).



## Referencias

- Algoritmos Genéticos, Dra. Katya Rodríguez Vázquez, México 2018
- Apuntes de Teoría de Inventarios, Dra. Patricia E. Balderas Cañas. México 2018
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte de inclusión de energías renovables” (Cuarto Entregable, Abril 2015).
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte de modelaje a nivel región” (Quinto Entregable, Octubre 2015).
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte de modelaje integrado a nivel regional” (Sexto Entregable, Abril 2016).
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte de prospección” (Séptimo Entregable, Octubre 2016).
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte de incidencias y ajustes” (Octavo Entregable, Abril 2017).
- C. MARTÍN DEL CAMPO et al. “Informe Técnico del Proyecto SIMISE: Reporte Final: Validación integral del sistema” (Noveno Entregable, Septiembre 2017).
- C. MARTÍN DEL CAMPO, “La planeación del Sistema Eléctrico Nacional”, Décimo Seminario sobre la Situación y Perspectivas del Sector Eléctrico en México bajo el tema Frente al futuro de las empresas eléctricas en el mundo: ¿Cuáles retos enfrentará la industria de suministro eléctrico en México?, IIEc - UNAM, Marzo 2017
- C. MARTÍN DEL CAMPO, “Integrated Energy Modeling System. SIMISE MODEL. Dialogues for the Future of Energy, Mexico (DEMEX)”, International Renewable Energy Conference (MEXIREC), CDMX, Septiembre 2017
- C. MARTÍN DEL CAMPO, MARTÍNEZ QUINTANA, M.A., “Gestión de Conocimiento en un Sistema de Planeación Energética”, Segundo Simposio Internacional sobre Educación, Capacitación, extensión y Gestión del Conocimiento en Tecnología Nuclear, Buenos Aires, Argentina, Noviembre 2017
- Definir y resolver un problema con solver, Microsoft Support, 2018, Consultado en: <https://support.office.com/es-es/article/definir-y-resolver-un-problema-con-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>
- Inventory Control, Love, S. Boston, 1979, McGrawHill
- L. GACITUA, et. al. “A comprehensive review on expansion planning: Models and tools for energy policy analysis” Elsevier, 2018
- Mathematical Modelling. A tool for problema solving engineering, physical, biological and Social Sciences, New York, 1990
- Matlab Documentation, MathWorks, 2019, Consultado en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/>

- Martínez Quintana Marco Antonio, Sistema de Modelación Integral del Sector Energético, 2015, Consultado en:  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8651/Informe.pdf?sequence=1>
- Programación Lineal <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigaci%C3%B3n-de-operaciones/programaci%C3%B3n-lineal/>
- Sociedad Mexicana de Investigación de Operaciones <http://www.smio.org/>