

2 CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO BOLIVIANO

2.1 SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL SIN

El Sistema Interconectado Nacional (SIN) es el sistema eléctrico que integra instalaciones de generación, transmisión y distribución en los departamentos de La Paz, Santa Cruz, Cochabamba, Oruro, Chuquisaca, Potosí, Beni y Tarija.

El Sistema Troncal Interconectado (STI) es la parte del SIN que comprende el sistema de transmisión en alta tensión en el que los Agentes inyectan, transmiten y retiran energía eléctrica.

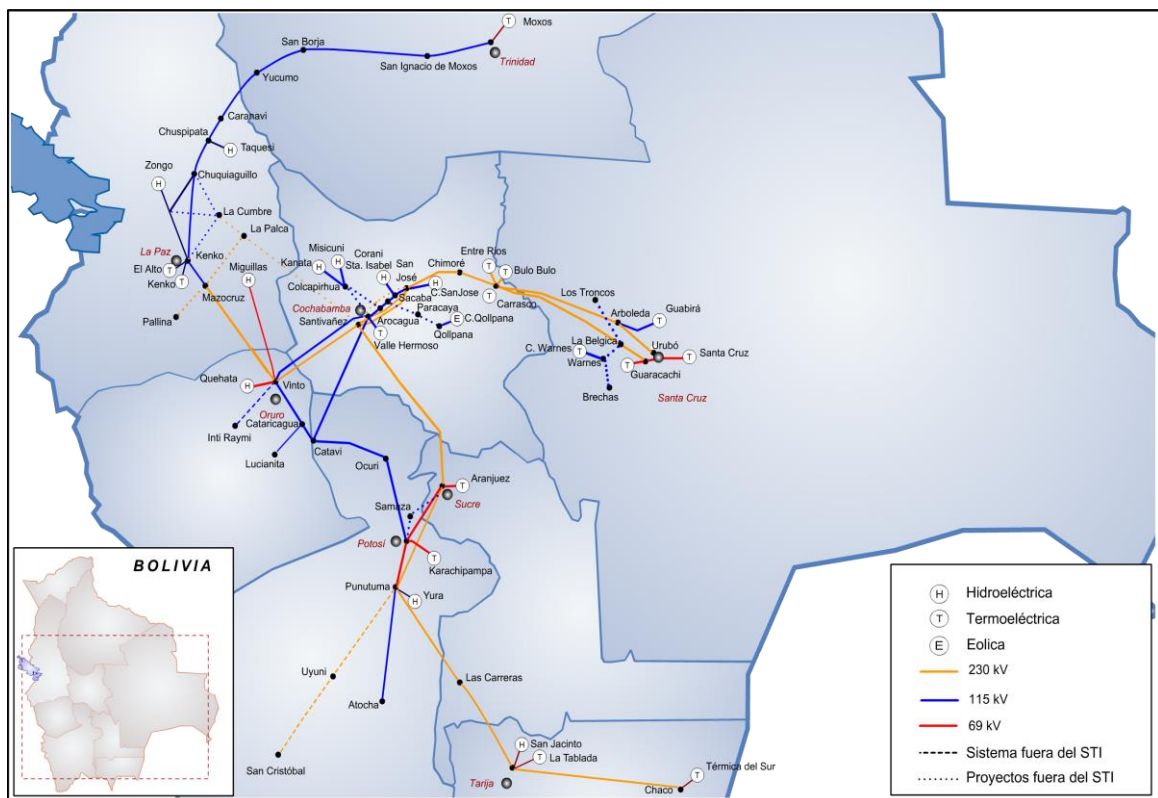
El Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) está compuesto por los Agentes que operan en el SIN (empresas de generación, transmisión, distribución y clientes no regulados), que venden y compran energía eléctrica sobre la base de precios referenciales y/o precios spot, con excepción de la transmisión [12].

El SIN se caracteriza por tener cuatro áreas principales bien definidas: Norte (La Paz), Oriental (Santa Cruz), Centro (Oruro, Cochabamba) y Sur (Potosí, Chuquisaca y Tarija). Cada área cuenta con generación local; en el área Norte (La Paz) con centrales hidráulicas de pasada principalmente, en el área Oriental con centrales térmicas y en las áreas Centro y Sur con centrales hidráulicas con embalse y térmicas. La red de transmisión posibilita principalmente intercambios de energía y potencia que optimizan el despacho de carga del SIN o complementan los déficits de un área con el objeto de abastecer la demanda de forma segura y confiable [31].

Recientemente han sido redefinidas las áreas en el SIN, es así que se tienen nueve áreas, esta definición básicamente se trata de una subdivisión de las cuatro áreas descritas con anterioridad. En la Figura 2.1 se muestra el mapa de Bolivia con las instalaciones del SIN en la misma están identificadas las 9 áreas del mismo. En la Figura 2.2 se muestra el mapa STI proyectado hasta el 2018.

Figura 2.1 Mapa del Sistema Interconectado Nacional y sus Áreas [11].



Figura 2.2 Mapa del Sistema Troncal Interconectado Actual y Proyectado [11].

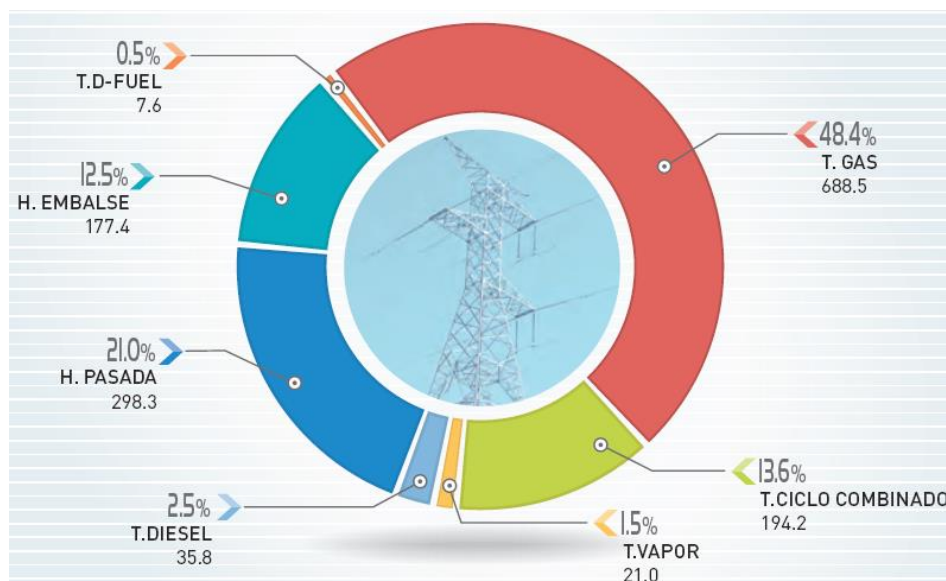
2.1.1 Capacidad de generación instalada

La oferta de electricidad en Bolivia está basada principalmente en centrales de generación hidroeléctrica (33.43%) y termoeléctrica (66.57%).

El parque hidroeléctrico está compuesto por centrales de agua fluyente (Zongo, Taquesi, Yura y Quehata), centrales con embalse (Corani y Miguillas) y una central cuya operación depende del abastecimiento de agua potable en la ciudad de Cochabamba (Kanata).

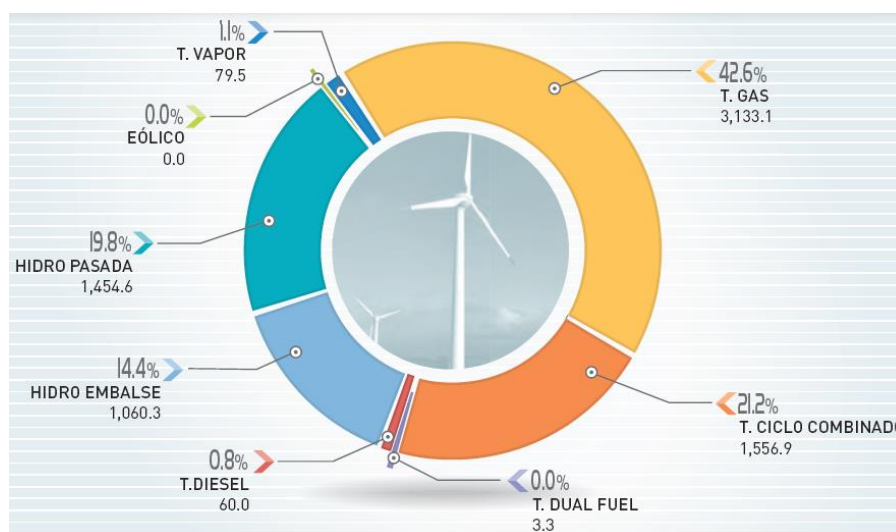
El parque termoeléctrico está compuesto por turbinas a gas natural de ciclo abierto, una turbina a vapor que opera con bagazo de caña de azúcar, motores a gas natural (Aranjuez MG) y unidades Dual Fuel (Aranjuez DF) que utilizan gas natural y diesel oil, una turbina a vapor de ciclo combinado que aprovecha los gases de escape de 2 turbinas a gas natural en central Guaracachi y motores a diesel oil (Centrales Moxos y Trinidad).

En la Figura 2.3 se muestra desagregado la Capacidad de Generación durante el año 2013 considerando los diferentes tipos de centrales eléctricas.

Figura 2.3 Capacidad de Generación por tipo de central instalada a 2013 (MW) [16]

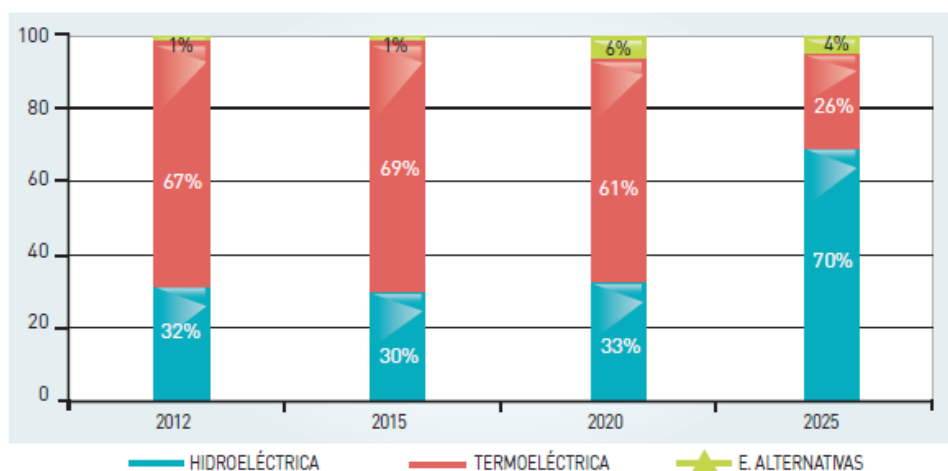
La capacidad de generación en el SIN a fines del año 2013 a nivel de bornes de generador, alcanzó a 1,422.76 MW; de los cuales 475.7 MW (33.43%) corresponden a centrales hidroeléctricas y 947.1 MW (66.57%) a centrales termoeléctricas. Esta capacidad térmica corresponde a la potencia efectiva en condiciones de máxima temperatura probable del sitio.

La Figura 2.4 presenta la Producción Bruta de Energía, clasificada según el tipo de central: centrales Termoeléctricas a Gas, a Diesel, a Vapor, Dual Fuel, Ciclo Combinado y centrales Hidroeléctricas de Embalse y de Pasada. Adicionalmente se considera la generación del Sistema Eólico Qollpana (P. Instalada 3 MW).

Figura 2.4 Generación Bruta por tipo de central (GWh) – 2013 [16]

Al año 2025, se prevé que la generación hidroeléctrica sea un 70% y la generación mediante energías renovables no convencionales sea un 4% del total. La composición de la matriz Energética se presenta en la Figura 2.5.

Figura 2.5 Composición de la Matriz Energética (%) [16]



Hasta el año 2025 se habría cambiado la matriz energética de tal manera que se tendría una mayor participación de generación hidroeléctrica y una menor participación de las termoeléctricas y otras basadas en energías renovables no convencionales.

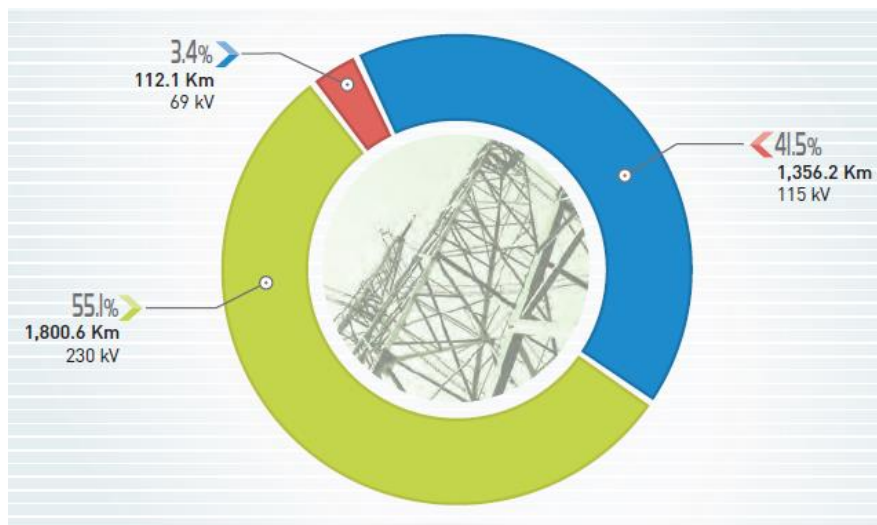
Los proyectos con energías renovables no convencionales comprenden: la generación con Biomasa en el Ingenio Azucarero San Buenaventura en La Paz, proyecto geotérmico Laguna Colorada en Potosí, ampliación central eólica Qollpana en Cochabamba, central eólica en Santa Cruz y generación fotovoltaica en el altiplano boliviano.

Según [13] hasta el año 2022 la capacidad de generación sería de aproximadamente 2300 MW y algo inferior sería la demanda máxima del sistema.

Por otro lado, según [16] y [17] se tendría una directriz de planificación tal que para el año 2025, el parque de generación instalada sea próxima a 6000 MW.

2.1.2 Estructura de transmisión de energía eléctrica

El Sistema Troncal de Interconexión a fines del año 2013 estaba compuesto por 1,800.6 km de líneas en 230 kV, 1,356.2 km de líneas en 115 kV y 112.1 km de líneas en 69 kV haciendo un total de 3,268.9 km de líneas de transmisión, cuyo detalle se presenta en la Figura 2.6.

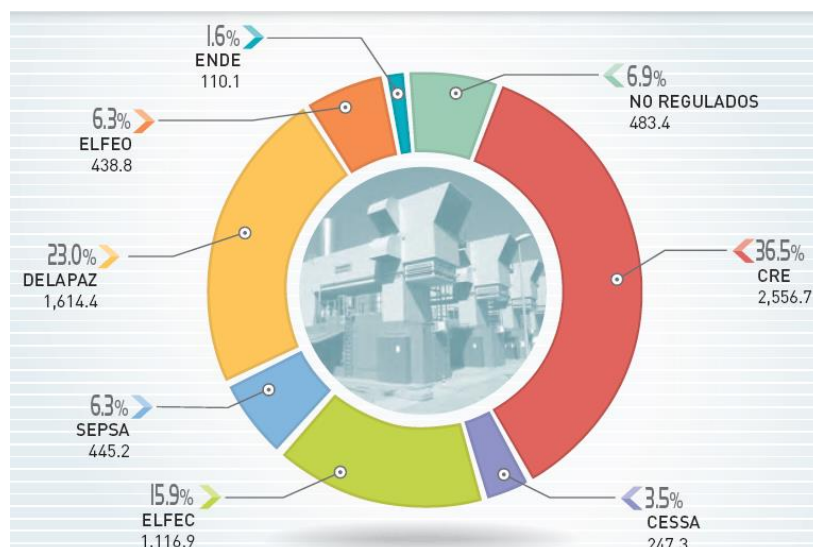
Figura 2.6 Longitud de Líneas por Nivel de Tensión (km) [16]

2.1.3 Consumo de Energía Eléctrica

Durante el año 2013, el consumo de energía eléctrica en el Mercado Eléctrico Mayorista fue de 7,012.8 GWh.

El consumo de energía en el SIN, está distribuido principalmente en las áreas Oriental (Santa Cruz) con el 36.5 %, Norte (La Paz y Beni) con el 24.6 % y el resto del SIN con el 38.9 %.

En la Figura 2.7 se muestra la participación porcentual de las empresas Distribuidoras y Consumidores No Regulados en las compras totales de energía en el MEM durante la Gestión 2013.

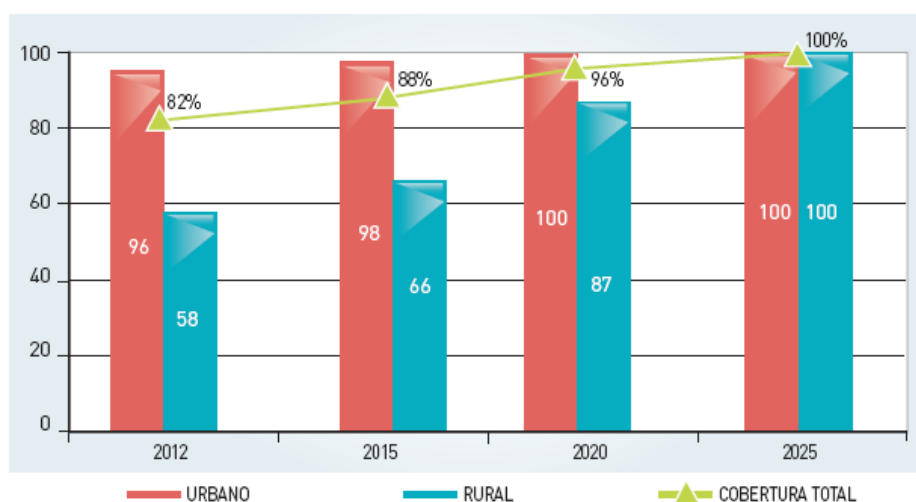
Figura 2.7 Compras totales de energía en el MEM – Año 2013[16]

2.1.4 Cobertura del servicio de energía eléctrica.

La cobertura del servicio de energía eléctrica del país al finalizar el año 2012 fue del 82%, de esta; la cobertura urbana llega al 96% y un 58% (aun uno de los más bajos de la región) en el área rural, este último dato al finalizar el año 2005 este indicador rondaba el 30%, debido a distintos proyectos energéticos impulsados por el gobierno, incluyendo el aprovechamiento de energías renovables, como el denominado, *Eurosolar* que benefició desde el 2008 a 5.566 familias de al menos 59 comunidades rurales del país, con la instalación de equipos generadores de electricidad alternativa que funcionan con energía solar y eólica.

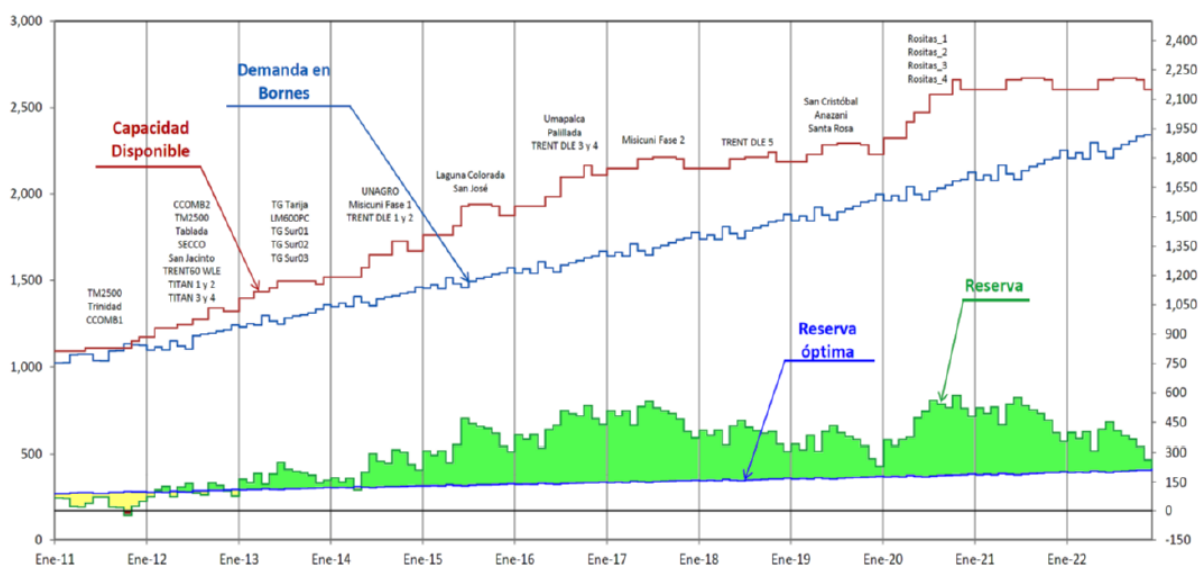
Según [16] se tendría planificado que la cobertura del servicio eléctrico llegue al 100% para el año 2025, la proyección de la cobertura se muestra en la Figura 2.8.

Figura 2.8 Cobertura de Electricidad 2012-2025 [16]



2.1.5 Balance de potencia

En la Figura 2.9 se presenta la evolución del balance de potencia (generación - demanda) del SIN para el horizonte de planificación período 2012 – 2022.

Figura 2.9 Evolución del balance generación demanda prevista [13]

En la parte superior se presenta, referida al eje vertical izquierdo, la capacidad disponible y la demanda. En la parte inferior de este gráfico se presenta, referida al eje vertical derecho, la reserva del sistema (en verde) y la reserva rotante óptima (línea azul) que, de acuerdo a la normativa actual, debería ser igual o mayor al 9% de la demanda a nivel de generación.

2.1.6 Potencial energético boliviano.

A pesar de que no se dispone estudios concluyentes que determinen todo el potencial energético máximo del país, según datos y estimaciones del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, Bolivia explota menos del 1% de todo su potencial energético (principalmente hidroeléctrico). La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en 2010 publica que Bolivia explota el 1% del potencial hidroeléctrico. Además Bolivia cuenta con grandes reservas de gas y recursos energéticos renovables como: geotérmica, biomasa, viento y una de las radiaciones más altas del mundo. En pocas palabras el potencial energético del país es enorme, la explotación estratégica de este potencial podría ser una base fundamental para el desarrollo del país.

2.2 MODELADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El desarrollo de software especializado ha revolucionado la forma de realizar estudios e investigación en muchos campos de la ingeniería y en especial en los SEP.

En la actualidad se tienen en el mercado de varias herramientas de análisis de SEP bastante desarrolladas, entre las más conocidas por esta están: PSSE, ETAP, DIgSILENT

Power Factory, NEPLAN, etc., pero claro unas más robustas que otras, algunas más amigables que otras o en definitiva unas más orientadas hacia un tipo de análisis que otros.

En presente trabajo se hará uso de los programas informáticos POWER FACTORY de DIgSILENT, NEPLAN y ATP-EMTP.

Se decide utilizar NEPLAN como un software alternativo a DIgSILENT para el análisis del SIN, la utilización de este segundo software tiene la finalidad de aprovechar algunos módulos de análisis que ofrecen más prestaciones de análisis, el uso de estos módulos permitirán un mejor análisis y comprensión de los fenómenos estudiados. Asimismo NEPLAN ofrece en comparación con otras herramientas de análisis de SEPs, una interfaz gráfica intuitiva y amigable al usuario. Por otro lado el proceso de modelado de todo del SIN en NEPLAN permitirá consolidar los conocimientos del modelado de la amplia gama de elementos y parámetros de un SEP de gran tamaño, ya que para el modelado se parte desde cero.

Para la decisión de utilizar los dos softwares se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Por una parte el operador del sistema eléctrico CNDC y todas las empresas del sector eléctrico boliviano utilizan DIgSILENT para los estudios eléctricos, de ahí la necesidad personal y profesional de la utilización de este software a un nivel avanzado así como la profundización en el estudio de los diferentes tipos de estudios a abordar.
- Se utilizará como base el sistema eléctrico la publicada con el informe de PMP 06/2014-05/2018 en formato DIgSILENT, pero el hecho de tener que utilizar una base de datos de un SEP ya elaborado, de cierta manera limita la tarea de modelado en SEP.
- Por otro lado, el modelar todo el SIN en NEPLAN, es una tarea para la cual se requiere conocimiento de los elementos, modelos y parámetros que se pueden encontrar en un SEP de gran dimensión, en este modelado se maneja la misma precisión y detalle que el CNDC maneja en DIgSILENT. Esta labor conlleva dificultades adicionales: la conversión de unidades y/o parámetros equivalentes para los elementos del SIN; esto representa la manipulación de gran cantidad de información (datos topológicos, parámetros en estado estacionario, de secuencia y dinámicos, escenarios de carga y variaciones cronológicas de la red, casos de estudio, etc.).

- Una vez modelado todo el SIN en NEPLAN se puede utilizar indistintamente cualquiera de las herramientas de análisis o eligiendo el módulo más adecuado de ellas para abordar un estudio específico.

Para validar el proceso del modelado del SIN en NEPLAN, se realizan diferentes tipos de estudios con las dos herramientas, los resultados son idénticos.

2.2.1 Breve descripción de NEPLAN

NEPLAN Power System Analysis es un software de planeamiento, optimización y simulación de redes eléctricas de transmisión, distribución e industriales, que incluye 19 módulos de cálculo entre ellos: flujo de potencia, flujo de potencia óptimo, estabilidad transitoria, estabilidad de voltaje, de pequeña señal, EMT/RMS simulación dinámica, confiabilidad, armónicos, contingencias, cortocircuito.

NEPLAN es utilizado en más de 80 países alrededor del mundo por más de 600 empresas, entre las que se cuentan grandes y pequeñas compañías del servicio de electricidad, industrias, firmas de ingeniería y universidades. Esta herramienta para estudios de redes eléctricas, fue desarrollada por BCP Busarello Cott Partner Inc. con la cooperación de ABB Utilities GmbH y Swiss Federal Institute of Technology.

2.2.2 Breve descripción de Power Factory de DIgSILENT

El software POWER FACTORY de DIgSILENT es una herramienta especializada en el análisis de SEPs, la cual permite realizar simulación digital y cálculo de redes eléctricas, los modelos matemáticos bajo los cuales se efectúan los cálculos están basados en normas y teorías mundialmente aceptadas como son la ANSÍ, IEEE y IEC.

Este software es utilizado en varias regiones del mundo. Se menciona al Reino Unido y Latinoamérica como dos de las zonas de utilización frecuente entre muchas otras zonas.

Power Factory abarca funciones predefinidas pero conociendo el Lenguaje de Programación DPL (DIgSILENT Programming Language), es posible crear nuevas funciones y nuevos elementos. A continuación se detallan los módulos probados y disponibles en DIgSILENT: flujo de potencia, despacho de potencia activa y reactiva, cortocircuitos, estabilidad, armónicos, confiabilidad, protecciones entre otras más.

2.3 METODOLOGÍA APLICADA AL MODELADO DEL SIN EN NEPLAN

Los diferentes elementos del SIN fueron identificados y modelados, con sus características, modelos y parámetros, esta es una tarea esencial para determinar el comportamiento en régimen estacionario y dinámico del sistema, de la manera más ajustada a la realidad.

En este sentido las máquinas sincrónicas, líneas de transmisión, transformadores, cargas, y los equipos de compensación serie y paralelo del SIN fueron modelados con precisión y rigurosidad, esto permite garantizar la calidad del modelado y la exactitud de los resultados a obtener. Así mismo; un buen modelado del SEP permitirá la utilización futura de la red del SIN en NEPLAN para la realización de análisis reales con variaciones de expansión, casos de estudio y escenarios de carga y generación.

Para el intercambio de información de DIgSILENT a NEPLAN, se plantea una técnica semi-automática que incluye el desarrollo de una herramienta en MS Excel para el manejo de la gran cantidad de información.

Para utilizar ambos programas para el análisis en el TFM era necesario contar con un procedimiento sistemático, un protocolo para la transferencia de información entre DIgSILENT Power Factory y NEPLAN, para garantizar la correcto manejo de la gran cantidad de información.

Tomando como de punto de partida la base de datos del PMP may 2014 – abr 2018 publicada por el CNDC, se ha planteado y utilizado el siguiente procedimiento para el modelado del SIN en NEPLAN:

- a. Se tomó el escenario medio seco para el año 2015 como referencia base.

Figura 2.10 Datos del sistema eléctrico base del SIN

ETSI - SEVILLA		GRID SUMMARY		DIgSILENT		Project: PFM - RCDA	
		Medio sec 2015 mis		PowerFactory		Date: 9/25/2014	
		CNDC PMP 14-18 PFM RCDA		15.0.0			
Grid: SIN	System Stage: SIN	Study Case: CNDC PMP 14-18 PFM RCDA		Annex: BASE 2015		/ 1	
Grid: SIN		Summary					
No. of Substations	2	No. of Busbars	478	No. of Terminals	95	No. of Lines	221
No. of 2-w Trfs.	242	No. of 3-w Trfs.	37	No. of syn. Machines	64	No. of asyn.Machines	0
No. of Loads	159	No. of Shunts	37	No. of SVS	0		
Generation	= 1020,61 MW	305,88 Mvar	1065,46 MVA				
External Infeed	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA				
Inter Grid Flow	= -1,54 MW	0,83 Mvar					
Load P(U)	= 978,09 MW	370,82 Mvar	1046,02 MVA				
Load P(Un)	= 978,09 MW	370,82 Mvar	1046,02 MVA				
Load P(Un-U)	= 0,00 MW	-0,00 Mvar					
Motor Load	= 0,00 MW	0,00 Mvar	0,00 MVA				
Grid Losses	= 43,22 MW	-159,97 Mvar					
Line Charging	=	-488,45 Mvar					
Compensation ind.	=	248,76 Mvar					
Compensation cap.	=	-154,56 Mvar					
Installed Capacity	= 1316,20 MW						
Spinning Reserve	= 295,59 MW						
Total Power Factor:							
Generation	= 0,96 [-]						
Load/Motor	= 0,94 / 0,00 [-]						
Inter Grid Flow to							
TRINI	= -1,54 MW	0,83 Mvar					
Total	= -1,54 MW	0,83 Mvar					

- b. Para el escenario base; en las opciones de “Flexible Data” de Power Factory DIgSILENT se clasificó para cada tipo de elemento la información de modelos y parámetros para la recuperación de información. Esta tarea requiere el conocimiento del modelado de los diferentes elementos de SEP, ya que la información que pueden obtenerse por “Flexible Data” es extensa.
- c. Filtrada toda la información del SIN en el “Flexible Data” de Power Factory Digsilent, los datos son exportados para su posterior procesamiento a unas hojas de cálculo estructuradas en MS Excel.
- d. Se realiza el modelado topológico de la red en NEPLAN: se decide mantener la misma disposición de la red base (en formato DIgSILENT), a cada elemento se le asigna una identificación única, es este el único parámetro que se ingresa manualmente, el resto de información será cargada con la herramienta estructurada en MS Excel, ya que el realizarlo manualmente demandaría un tiempo mucho mayor y la probabilidad de cometer errores sería alta ya que la cantidad de información es grande.

Existe otra alternativa en la que no sería necesario el modelado topológico manual, que es utilizando la opción de auto-disposición en NEPLAN juntamente con archivos auxiliares, pero el diagrama de red para un sistema grande como el SIN hace que se presenten inconvenientes entre otras cosas con la disposición y con la identificación de los elementos, inconvenientes adicionales son mencionados en [18]. De ahí que el modelado topológico de la red se la realiza por una única vez, de forma gráfica.

- e. Se realiza la sintonización de entre MS Excel y NEPLAN, para la sintonización adicional de escenarios de carga, topología, variaciones, etc. se la realiza prácticamente en minutos.

En capítulos posteriores se puede verificar que el modelado del SIN en NEPLAN es prácticamente una réplica de la base que se tenía en DIgSILENT, y atendiendo las mismas necesidades de precisión que requiere el operador del sistema eléctrico, esto se puede corroborar que los resultados de los diferentes tipos de estudios son idénticos.

En el Anexo I se presentan los modelos del SIN en Power Factory DIgSILENT y NEPLAN.

2.4 CONCLUSIÓN DEL MODELADO DEL SIN

El intercambio de información de Power Factory DIgSILENT a NEPLAN con la metodología planteada, una vez graficada la topología es una forma eficaz de intercambiar los datos y ahorra bastante tiempo, y la transferencia de información de casos de análisis y escenarios es inmediata, además se reduce la probabilidad de cometer errores en la digitación de información de ingresarse los datos de forma manual, con todos los inconvenientes que esto conllevaría.