

# **1 ANTECEDENTES PARA ESTUDIOS PARA LA CONEXIÓN DE INSTALACIONES NUEVAS EN EL SIN**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

El estudio de energización de nuevas instalaciones se lo realiza sobre el sistema eléctrico boliviano, se realiza siguiendo normativa nacional específica en la materia.

Para que el Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC), operador del sistema eléctrico boliviano autorice la incorporación al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y la operación comercial de nuevas instalaciones, los propietarios de las mismas deben presentar los estudios requeridos por la normativa boliviana al CNDC. Los mismos deberán estar conforme a lo exigido en la normativa para contar con la aprobación de los estudios para la energización. Estos estudios de pre-operatividad tienen la finalidad de simular el funcionamiento de las nuevas instalaciones conectadas al SIN y evaluar que estos no impacten negativamente al resto del sistema eléctrico.

En lo referente a la normativa boliviana, la Norma Operativa Nro 11 [15] describe los tipos de estudios que son requeridos para la incorporación de nuevas instalaciones al SIN así como el alcance de los mismos, la misma fue aprobada por la RESOLUCIÓN SSDE N° 123/2001 La Paz, 2 de agosto de 2001.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DE LA NECESIDAD DEL ESTUDIO**

Para analizar la situación actual del sistema eléctrico boliviano se ha consultado las referencias [11, 13, 14, 16, 17]. Del análisis del sistema se rescata que; para los próximos 10 a 15 años se tendrá un crecimiento importante en la infraestructura de transmisión y generación, este crecimiento se debe a un plan de desarrollo para un sistema eléctrico que actualmente es uno de los más pequeños de la región (hasta finales del 2014, la capacidad instalada de generación de energía eléctrica era de 1.480 MW y la demanda máxima alrededor de los 1.300 MW, la infraestructura de transmisión está débilmente mallada y la cobertura en el sector rural inferior al 55%).

Bolivia experimenta un crecimiento en la demanda de energía eléctrica superior a la tasa histórica, y se tiene proyectado que este crecimiento en los próximos años será a tasas de crecimiento mayor, esto debido a los índices económicos y de producción que desde hace

un par de años cierran gestión con indicadores positivos, de hecho con los mejores indicadores económicos de la región.

Desde varios meses previos a la elaboración del presente trabajo; el sector eléctrico atraviesa por una reestructuración, un primer cambio es que la mayor parte de las empresas del sector eléctrico operan bajo las directrices que dicta la estatal Empresa Nacional de Electricidad (ENDE Corporación).

En años previos al 2012; instalaciones nuevas de transporte y de generación que ha entrado en operación comercial es casi inexistente, tal es así que a finales del año 2011 se presentaron apagones en el SIN debido a que la demanda máxima había superado a la capacidad de generación en horas punta. A partir de esos eventos, se han venido instalado centrales pequeñas y medianas de generación (casi todas termoeléctricas) obedeciendo un plan de emergencia y otras medidas complementarias.

En el POES 2012 – 2022 se estima que hasta el año 2022 la capacidad de generación sería de aproximadamente 2300 MW. Según información del ministerio del área, hasta el año 2025 se tendría proyectada que la capacidad instalada de generación eléctrica sería de un valor próximo a 6 GW (un objetivo que viene a ser parte de una agenda por el bicentenario del país en ese año), una parte de la energía se exportaría a países vecinos, aunque todavía estos datos no se muestran en un documentación de planificación del sistema eléctrico. En todo caso en los próximos años el sistema eléctrico experimentará un crecimiento importante en su infraestructura.

Después de haber realizado un análisis del estado actual del sector eléctrico boliviano, se identifica que; al preverse un crecimiento importante en infraestructuras, los estudios pre-operativos (Norma Operativa Nro 11) deberán ser elaborados con mucha más frecuencia que en años anteriores, ya que todos los futuros proyectos a ser incorporados al SIN, por normativa deben contar la aprobación del CNDC de los estudios eléctricos mencionados.

El Cuadro 1.1 muestra un resumen de los estudios que son requeridos en la Norma Operativa Nro 11.

**Cuadro 1.1** Alcance de los estudios de la Norma operativa Nro 11 [15]

ALCANCE DE LOS ESTUDIOS	INSTALACIONES DE:			
	Generación	Transmisión	Distribución en AT y MT	Consumidor No Regulado
Requisitos Mínimos ( para toda Instalación mayor a 5 MVA)				
Flujos de Potencia (D Max, Med, Min), 1er y 2do año.	✓	✓	✓	✓
Nivel de cortocircuitos (Máxima Generación)	✓	✓	✓	✓
Coordinación de Protecciones	✓	✓	✓	✓
A solicitud fundamentada, el CNDC podrá requerir la realización de estudios:				
Estabilidad Transitoria y Dinámica (D Max, Med, Min), 1er y 2do año	✓		✓	✓
Transitorios Electromagnéticos	✓	✓	✓	✓
Coordinación los Reguladores de Frecuencia y de Tensión	✓			
Resonancia Subsíncronica*		✓		
Generación de Armónicas			✓	
Efecto Flicker			✓	✓

\* En caso de capacitor serie

### 1.3 ALCANCE

El presente trabajo tiene una finalidad aplicativa de la realización de la mayor cantidad de tipos de estudios descritos en el Cuadro 1.1. No se pretende que los estudios constituyan documentación formal de los proyectos, sino más bien un trabajo académico en la que se desarrollen los estudios enmarcados en la Norma Operativa Nro 11 con rigurosidad académica necesaria en el Análisis de SEP, el interés del autor es llegar a consolidar los conocimientos necesarios para la realización de los estudios contemplados en dicha norma, así como la de desarrollar las destrezas y habilidades en el manejo de herramientas para tales análisis.

De acuerdo con [11],[13],[14] en los próximos se prevé la conexión de nuevas unidades de generación (principalmente hidroeléctricas) y nuevas líneas de transmisión, de ahí que se decide realizar estudios tipo para la incorporación de unidades de generación y de transmisión al SIN. Se revisó la información de las próximas conexiones de instalaciones al SIN para identificar un proyecto que contemple tanto un componente de generación como de transmisión, se identifica el proyecto de la “Central Hidroeléctrica Misicuni” como la hidroeléctrica más próxima a ser incorporada, pero el componente de transmisión, por la longitud y la el nivel de tensión (15 km y 115 kV), según [15], no sería necesaria la realización de los estudios de transitorios electromagnéticos. Por esta razón se decide también estudiar la energización de un segundo proyecto, una línea de transmisión importante.

Es así que se elige realizar los estudios para la energización de:

- La línea de transmisión “Santibáñez – La Cumbre” de 230 kV.
- La central hidroeléctrica “Misicuni” para en su primera etapa.

Se elige la LT Santibáñez – la Cumbre como segundo proyecto a estudiar por su longitud, configuración y nivel de tensión hacen que se pueda realizar también los estudios de transitorios electromagnéticos en la energización, como se muestra en el Cuadro 1.1.

El abarcar una variada gama de estudios eléctricos en un SEP de magnitudes como el SIN, podría llegar a ser un problema, en el sentido de que el tamaño del documento sea descomunal. En ese sentido se ha visto por conveniente realizar los estudios eléctricos con el detalle requerido en la normativa boliviana, con las siguientes restricciones en cuanto al tamaño del documento:

- Se realizarán los estudios de Flujos de Potencia para todos los escenarios requeridos pero NO se repetirán los estudios para el segundo año de operación, el realizar los mismos para años siguientes, es proceso repetitivo que aumentaría el volumen del estudio.  
El hecho de haber tomado dos proyectos para los estudios eléctricos y por el desfase en el ingreso en operación de las mismas, los estudios de flujos de potencia caracterizarán la operación típica anual del SEP boliviano y su comportamiento por épocas y escenarios de carga.
- Se realizarán los estudios de Estabilidad Transitoria y Dinámica (para el proyecto de generación) solamente para el primer año, en cuanto a los escenarios a analizar solo tendrá sentido realizar los mismos para el bloque de máxima carga, ya que la central hidroeléctrica solamente estará en operación en los bloques de máxima carga.
- En lo concerniente al estudio *coordinación de protecciones* se presenta el siguiente inconveniente: a pesar de que DIGSILENT y NEPLAN tienen la capacidad de realizar este estudio, en la práctica se utiliza otro software que está orientado exclusivamente a la coordinación de protecciones, este es *CAPE (Computer-Aided Protection Engineering)*, este es también el software utilizado para tal finalidad en el SIN, en él se encuentra modelado el sistema de protección del SIN; TCs y TPs, ajustes de relés, etc. Al no tener la posibilidad acceder a la base de datos ni al software, no se podría desarrollar este estudio, en su lugar se decide desarrollar otro estudio de interés en el análisis de SEPs, este es análisis de *Estabilidad de voltaje* en el SIN.

Está establecido en [15] que los propietarios de nuevas instalaciones deben solicitar al CNDC, la información del sistema eléctrico, ya que estos estudios deben ser satisfactorios

y suficientes para el CNDC. La información que se maneje entre ambas partes debe ser lo más precisa posible. La base de datos que se utilizará será la publicada con el informe de Planificación de Mediano Plazo (PMP) 06/2014-05/2018, la mencionada base de datos está en formato del software DIGSILENT Power Factory, por lo mismo se utilizará este software para gran parte de los estudios eléctricos.

Pero adicionalmente, al tratarse el presente de un estudio académico se decide utilizar NEPLAN como un segundo software para el análisis del SIN, la utilización de este software es principalmente para aprovechar algunos módulos de análisis que ofrecen más prestaciones de análisis, más detalles al respecto se presentan el capítulo II.

De lo anterior y para tener una visión más clara del trabajo a realizar y del alcance del mismo, se presenta parte de trabajo a realizar en el Cuadro 1.2.

*Cuadro 1.2 Resumen del Alcance de los estudios del TFM.*

CAPITULO II	CAPITULO III	CAPITULO IV	CAPITULO V	CAPITULO VI
MODELADO DEL SIN Y CARACTERIZACIÓN DEL SEP. BOLIVIANO	FLUJOS DE POTENCIA, ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS Y NIVELES DE CORTO CIRCUITO EN EL SIN	ESTABILIDAD DE VOLTAJE DEL SIN	ESTABILIDAD TRANSITORIA EN EL SIN	TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS POR MANIOBRAS
Caracterización del sistema eléctrico boliviano	Flujos de Potencia en (4Es. NEPLAN, 2 Es. Digsilent)	Análisis de sensibilidad V-Q	Modelado de Planta Hidroeléctrica	Modelado de LT SAN-CUM230 en ATP-EMTP
Modelado de todo el SIN en NEPLAN hasta régimen Dinámico	Análisis de contingencias	Análisis Modal	Respuesta al escalón de Elementos de Regulación y control	Energización en Trf. y Reactor
Modelado de proyectos LT y GEN sobre la base en PF Digsilent	Análisis de Niveles de Cortocircuitos	Curvas P - V, Curvas Q-V.	Análisis de Estabilidad Transitoria del SIN	Maniobras de energización en LT
		Planteamiento de Posibles medidas correctivas		Medidas para mitigar de sobretensiones
 	 			

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo General

Realizar los estudios eléctricos mencionados en la Norma Operativa Nro.11 para la línea de transmisión “Santibáñez – La Cumbre” y la “Central Hidroeléctrica Misicuni”.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la bibliografía los tópicos del análisis de SEP a desarrollarse.
- Realizar una caracterización del sistema eléctrico boliviano
- Realizar el modelado del SIN.
- Realizar el Estudio de Flujos de potencia, Niveles de cortocircuito y Análisis de Contingencias.

- Realizar el Estudio de Estabilidad de Voltaje.
- Realizar el Estudio de Estabilidad Transitoria y Dinámica.
- Realizar el Estudio de Transitorios Electromagnéticos.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

En el contexto actual del SEP boliviano se identifica que para atender la creciente demanda de energía eléctrica y para incrementar la confiabilidad del sistema, en los próximos años se pondrán en marcha la construcción y puesta en operación de nuevas centrales de generación eléctrica y de líneas de transmisión de energía eléctrica.

Para la incorporación de las nuevas instalaciones al SIN, será imprescindible la elaboración mínimamente de los estudios del primer grupo del Cuadro 1.1.

Los estudios adicionales (la segunda parte del Cuadro 1.1) son realizados a solicitud fundamentada por el CNDC, es decir cuando el operador del sistema considera que es necesaria la ampliación de los estudios para verificar el comportamiento del sistema con la incorporación de nuevas instalaciones.

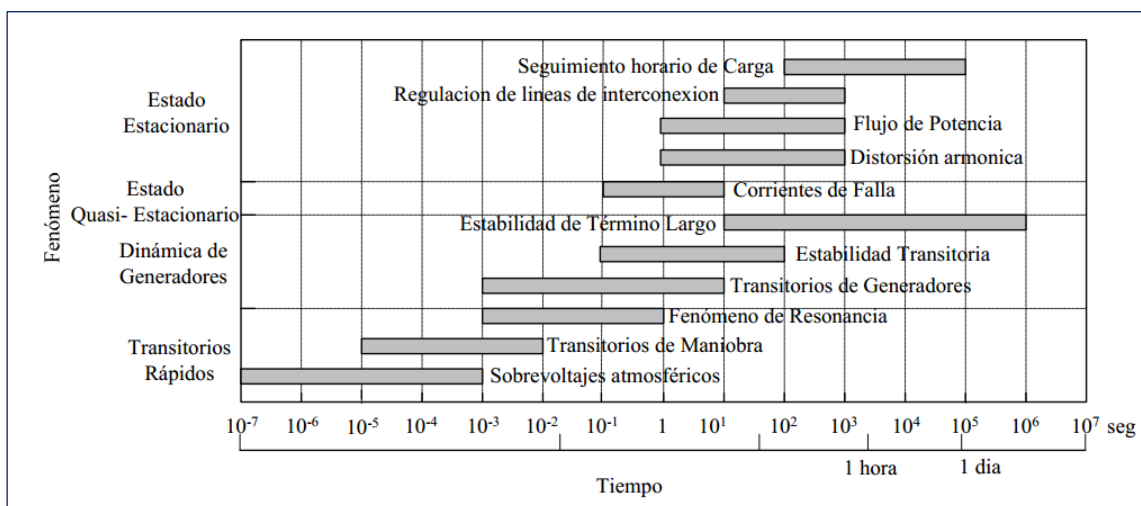
En el presente trabajo se pretende realizar un énfasis en los denominados estudios adicionales complementarios, ya que la habilidad para encarar estos estudios exige conocimientos ampliados en análisis de SEP, de la utilización las diferentes técnicas para el abordaje de los estudios y la habilidad y destreza en la utilización de herramientas especializadas para el análisis de SEP.

Por otra parte, los estudios adicionales o complementarios descritos en el Cuadro 1.1 no necesariamente son abordados en los programas de grado en ingeniería y son más bien abordados en cursos máster porque los mismos requieren una profundización y ampliación en el análisis de SEP.

En la realización del trabajo se consolidarán los conocimientos necesarios para la realización de los diferentes tipos de estudios exigidos en la *Norma Operativa Nro 11*, ofrece una excelente posibilidad de abordar diferentes temas en el análisis de SEP, los mismos tienen también una aplicación tanto en la etapa de planificación como en la de operación de los SEP, y ante el contexto futuro inmediato expuesto, los conocimientos adquiridos en el presente Trabajo Fin de Master tendrán una aplicación directa.

En la Figura 1.1 se presenta la categorización de fenómenos que ocurren en el SEP de acuerdo a escala de tiempo o la banda de frecuencia en la cual el fenómeno físico de interés ocurre.

**Figura 1.1** Fenómenos dinámicos de un SEP de acuerdo a escala de tiempo. [26]



## 1.6 METODOLOGÍA

Los estudios eléctricos se agrupan y se desarrollan en capítulos según el detalle expuesto en el Cuadro 1.2, debido a que la información obtenida de los estudios puede llegar a ser extensa, esta se analiza de manera sintetizada, es decir procesada en; figuras, cuadros comparativos, etc., esto para mejorar el análisis y la interpretación. Aun así se adjuntan los resultados de los estudios eléctricos en los anexos correspondientes y en el disco compacto (CD) adjunto al TFM, todos los resultados de los estudios eléctricos.

Para cada tipo de estudio solamente se hace una breve exposición teórica de los conceptos y características más relevantes para entrar en contexto del estudio. La exposición teórica de los tipos de análisis de SEP es sumamente extensa, para cada apartado se consultó una amplia biografía. En la sección de bibliografía se presentan las referencias consultadas.

Con la finalidad de estar más interiorizado con los diferentes temas de análisis de SEP y el manejo de las herramientas para tal finalidad (Neplan, Power Factory DIgSILENT, ATP-EMTP), fueron desarrollados trabajos relacionados con el análisis de SEP para asignaturas: Laboratorio de Análisis de Redes, Planificación Óptima de Redes Eléctricas, Sistemas Eléctricos en Régimen Transitorio y Explotación Óptima de Redes Eléctricas. Esto ayudó a la mejor comprensión de los temas de análisis de SEP.

