

PREFACIO

Sin duda, la electricidad es una forma de energía versátil de la cual nos hemos vuelto dependientes, no sólo a nivel residencial y comercial sino industrial, al grado de llegar a calificarle como el motor de desarrollo de un país. La combinación del conocimiento del hombre sobre las diversas formas de energía y los avances tecnológicos, ha dado lugar a la creación de varios tipos de plantas generadoras de electricidad. Hoy en día la mayor parte de la energía eléctrica que se genera en México y el mundo proviene de la quema de combustibles fósiles¹, lo cual representa una emisión considerable de gases de efecto invernadero que dañan el medio ambiente; sumado a esto, el agotamiento de los mismos en un futuro no muy lejano, pues la demanda eléctrica va creciendo constantemente y será necesario buscar fuentes alternas de energía.

En la actualidad, aproximadamente, el 16% del consumo mundial de la energía eléctrica proviene de plantas nucleoelectricas, el 65% de centrales termoeléctricas (turbogas, ciclo combinado, diesel, carboeléctrica), y el 19 % restante por hidroeléctricas, geotérmicas, entre otras. En México el comportamiento es parecido, salvo que el porcentaje debido a plantas nucleoelectricas se ve mucho más reducido y el proveniente de centrales termoeléctricas se eleva considerablemente. En México, durante 2007 el 4.51% de la energía eléctrica provino de la única planta nucleoelectrica, la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde (CNLV); el 80.46% correspondió a centrales termoeléctricas; el 11.71% a centrales hidroeléctricas y el 3.32% restante a plantas geotermoeléctricas y eoloeléctricas². Si analizamos la información anterior es necesario ir diversificando las fuentes de energía primaria para la generación de energía eléctrica.

Asegurar el suministro de energía con calidad, oportunidad y mínimo impacto al medio ambiente, constituye uno de los mayores retos a los que se enfrenta actualmente la humanidad, por ello en la generación de energía eléctrica que se demanda, cobra vital importancia la opción nuclear. En México, la diversificación se puede lograr expandiendo las fuentes renovables como la hidráulica, minihidráulica, eólica, geotérmica, solar, biomasa y bioenergética, así como con la expansión de la capacidad nucleoelectrica existente, o construyendo plantas nucleoelectricas de diseños avanzados que ya operan o que están próximas a construirse en otros países. Por ello, una opción atractiva es incrementar la capacidad de la única central nucleoelectrica ubicada sobre la costa del Golfo de México, en el Municipio de Alto Lucero, Estado de Veracruz, la CNLV.

¹ Recursos no renovables: Gas Natural, combustóleo, carbón y diesel

² Fuente: Secretaria de Energía con datos de Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro. Estadísticas de Energía, Subsecretaría de Electricidad.

El presente trabajo conlleva a realizar un análisis económico y eléctrico, a nivel de líneas de transmisión, para tener la información relevante al momento de seleccionar entre tres reactores de diferente capacidad 1100, 1350, 1600 MWe para instalarse en dicha Central Nucleoeléctrica, donde ya existen dos unidades de 780 MWe cada una.

Se estudiará el impacto que causarán cada uno de los reactores en la red de distribución considerando sus características de días de mantenimiento requeridos y la tasa de salidas forzadas, así como el abastecimiento de energía de la central a la carga en la Zona Oriental del país, con cada una de las unidades consideradas. Se analizará cuál de las tres opciones es la mejor en cuanto a confiabilidad y costo de infraestructura para transmitir la energía adicional que va a proporcionar la central eléctrica. Se realizará un estudio sobre el aumento de la potencia generada en el Sistema Eléctrico Nacional, proveniente de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, con tres distintos generadores de capacidades de 1100, 1350 y 1600 MW. Además se analizará qué infraestructura adicional se necesitará hacer en la Planta Nucleoeléctrica en caso de ser necesario, así como qué materiales serán necesarios implementar para la transmisión de dicha energía.

Se contemplarán los casos de contingencia, como las fallas eléctricas que se puedan suscitar al perder una de las líneas de transmisión, así como el tiempo que el reactor cubrirá las necesidades de la carga de la parte oriental del país. Los estudios se harán con base en los datos de cada uno de los reactores, como capacidad, espacio necesario para la instalación, días de mantenimiento en los que no estarán activos, así como los datos de la carga de la zona oriental a corto y largo plazo, y los costos de los materiales que se usarán para la transmisión, todo esto para comparar qué reactor es la mejor opción para ser instalado en la CNLV en cuanto al beneficio que obtenemos contra el costo de la implementación a corto y largo plazo.

1. INTRODUCCION

1.1 La Energía Nuclear

La materia del Universo está formada por moléculas que a su vez están constituidas por átomos. El átomo está constituido fundamentalmente, por un núcleo compuesto de protones, neutrones y por electrones que giran alrededor de éste. El protón y el neutrón tienen prácticamente la misma masa, pero se diferencian en que el primero posee una carga eléctrica positiva, mientras que el segundo carece de carga. El tercer tipo de partícula del átomo es el electrón, el cual, aunque es 1840 veces más ligero que el protón, posee una carga negativa, éstos se localizan girando alrededor del núcleo, formando lo que pudiéramos llamar una “nube”. La cantidad de electrones de un átomo es igual al número de protones que contiene el núcleo, razón por la cual sus cargas eléctricas se encuentran balanceadas.

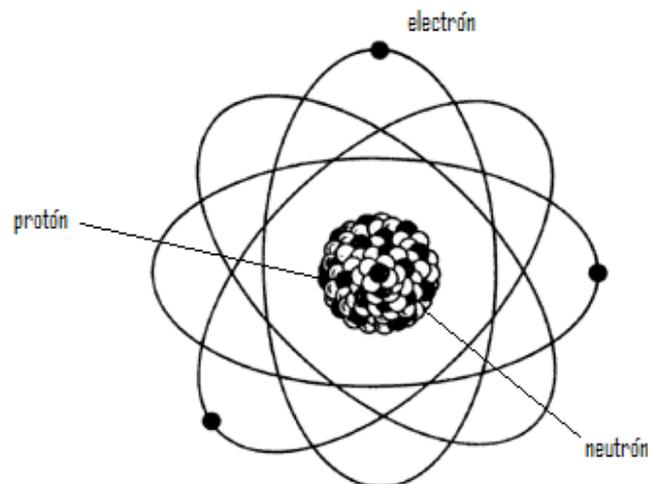


Figura 1.1 Estructura del átomo

El número de protones que contiene el núcleo de un átomo se denomina número atómico y es igual al número de electrones orbitales. La suma del número de protones y el de neutrones se conoce como número de masa. Este número proporciona una idea aproximada de la masa del átomo, ya que las masas de ambas partículas son aproximadamente iguales y la masa de los electrones es comparativamente despreciable. En la naturaleza existen 272 átomos estables con distintos números de masa que dan lugar a los 103 elementos plenamente identificados. Cada elemento está formado por átomos del mismo número atómico, pero que pueden tener diferente número de masa; estos átomos reciben el nombre de isótopos. El elemento uranio, con

número atómico 92, tiene fundamentalmente dos isótopos, cuyos números de masa son 235 y 238.

Los experimentos sobre la radioactividad de ciertos elementos como el uranio, el polonio y el radio, llevados a cabo a finales del siglo pasado por Henri Becquerel, Pierre y Marie Curie³, condujeron en 1902 al descubrimiento del fenómeno de la transmutación de un átomo en otro diferente, a partir de una desintegración espontánea que ocurría con gran desprendimiento de energía. Poco después, en 1905, los estudios de Einstein explicaron que dicho desprendimiento de energía era el resultado de la transformación de pequeñísimas cantidades de masa de acuerdo con la ecuación $E = mc^2$. Ambos hechos condujeron a la conclusión de que si se lograban desintegrar a voluntad los átomos de algunos elementos, seguramente se podrían obtener fabulosas cantidades de energía.

En 1938 Otto Hahn, Fritz Strassman y Lise Meitner pudieron comprobar el fenómeno de la fisión nuclear, bombardeando con neutrones núcleos del isótopo del uranio-235 (^{235}U). En esta reacción cada núcleo se parte en dos núcleos de masas inferiores, emite radiaciones, libera energía que se manifiesta en forma térmica y emite dos o tres nuevos neutrones que a su vez pueden ocasionar más fisiones. Esta última circunstancia llevó al físico italiano Enrico Fermi a tratar de mantener y controlar una reacción nuclear, utilizando los neutrones producidos en la fisión de núcleos del uranio-235, para fisiónar otros núcleos del mismo isótopo en lo que se denomina una “reacción en cadena”, lográndolo finalmente el 2 de diciembre de 1942. El control de la “reacción en cadena” se obtuvo mediante la absorción o captura de los neutrones libres por elementos como el boro y el cadmio. La Figura 1.2 ilustra la reacción en cadena en un reactor nuclear.

$$1\text{Mev} = 1.609 \times 10^{-13} \text{ Joules}$$

³ Bulbulian, Silvia (1987). «El descubrimiento de la radioactividad», Fondo de Cultura Económica (ed.). La radiactividad, Phroneris, Biblioteca Digital, 1ª edición.

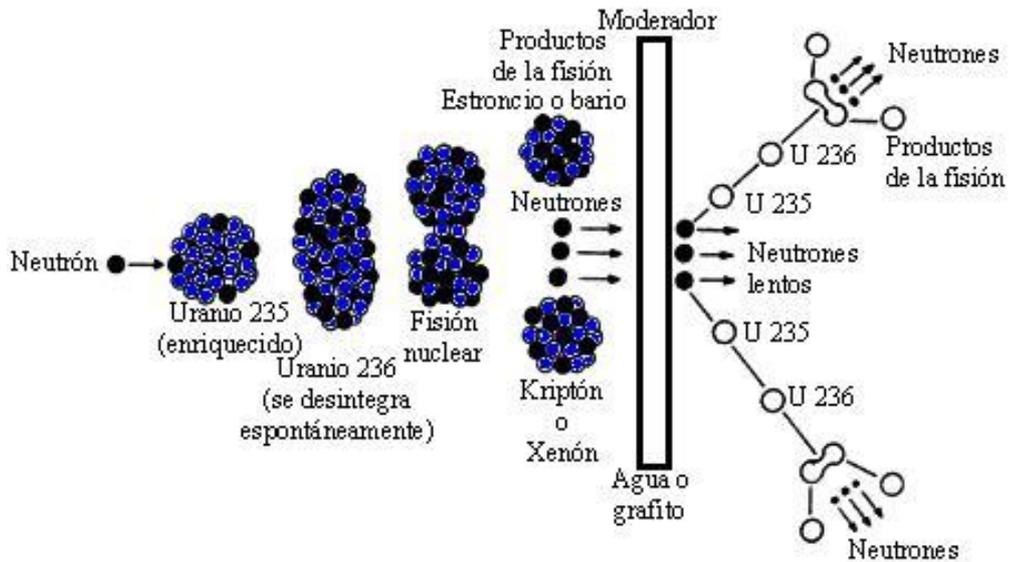


Figura 1.2 Reacción de fisión del Uranio-235 ⁴

1.2 Combustible, el uranio

El Uranio-235 es el único isótopo que existe en la naturaleza y se encuentra en una proporción de 0.72% en el uranio natural, el resto es Uranio-238, que es un material fértil para la cría de Plutonio. El uranio es un elemento relativamente abundante en la naturaleza, y existe en 2 a 4 partes por millón en la corteza terrestre. Su abundancia es similar a la del arsénico o la plata. El agua de mar contiene del orden de 3 partes por billón, y con ello es una reserva potencial de 4 mil millones de toneladas. Las reservas de uranio mundiales razonablemente seguras y las adicionales estimadas, con un costo de extracción y de elaboración hasta de 110 dólares por kilogramo se calculan, excluyendo Rusia, China y los demás países socialistas, en 4.3 millones de toneladas de óxido de uranio (U_3O_8). De éstas 10600 toneladas se encuentran en México, cantidad que se estima suficiente para las recargas de la CNLV durante toda su vida, con un excedente del 30%.

El uranio empleado en los reactores puede ser en dos formas:

- *Natural*, que contiene 0.72% de uranio-235 y 99.3% de uranio-238, el cual no se fisiona.
- *Enriquecido*, al que artificialmente se eleva la concentración del uranio-235 hasta un 3 ó 4% disminuyéndose la del uranio-238 al 97 y 96% respectivamente.

⁴ Fuente: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ININ, México

1.3 Centrales Nucleoeléctricas

Tras su uso mayoritariamente militar, fue hasta el 20 de diciembre de 1951 cuando por primera vez se empleó la energía nuclear para generar electricidad, se generó con un reactor nuclear, en el reactor americano EBR-1, con una potencia de unos 100kW, pero no fue hasta 1954 cuando se conectó a la red eléctrica una central nucleoelectrica, la central nucleoelectrica rusa *Obninsk*⁵.

Una central nucleoelectrica es una instalación industrial donde se logra transformar mediante varios procesos la energía contenida en los núcleos de los átomos, en energía utilizable. Es similar a una central termoeléctrica convencional, la diferencia estriba en la forma de obtener el calor para la producción de vapor. Mientras que en una termoeléctrica el calor se obtiene quemando combustibles fósiles o extrayendo vapor natural del subsuelo, en una nucleoelectrica el calor se obtiene a partir de la fisión nuclear en un reactor. Las centrales nucleoelectricas constan de uno o varios reactores, que son contenedores en cuyo interior se albergan varillas u otras configuraciones geométricas de minerales con algún elemento fisil ó fértil. La reacción de fisión se produce al partir los núcleos atómicos de algún elemento, como el uranio-235 o el plutonio-239, mediante el bombardeo de los mismos con neutrones. La reacción de fisión de cada uno de estos núcleos, produce:

- Un gran desprendimiento de energía calorífica y electromagnética
- La formación de dos nuevos núcleos de masa inferior a la del núcleo original
- La separación de dos o tres nuevos neutrones

Los dos o tres neutrones que se separan se aprovechan para fisionar a otros núcleos, continuando así el proceso en forma encadenada, es decir, se tiene una “reacción en cadena”. El calor obtenido de la reacción es utilizado para calentar agua en el interior de los reactores, produciéndose así el vapor que es utilizado para hacer girar una turbina, que no es más que un conjunto de discos provistos de álabes o paletas, este movimiento es transmitido al generador el cual producirá la electricidad.

La fisión de un kilogramo de Uranio-235 libera 18.7 millones de kilowatts-hora en forma de calor.

1.3.1 Funcionamiento de una Central Nucleoelectrica

Las centrales nucleoelectricas constan principalmente de cuatro partes:

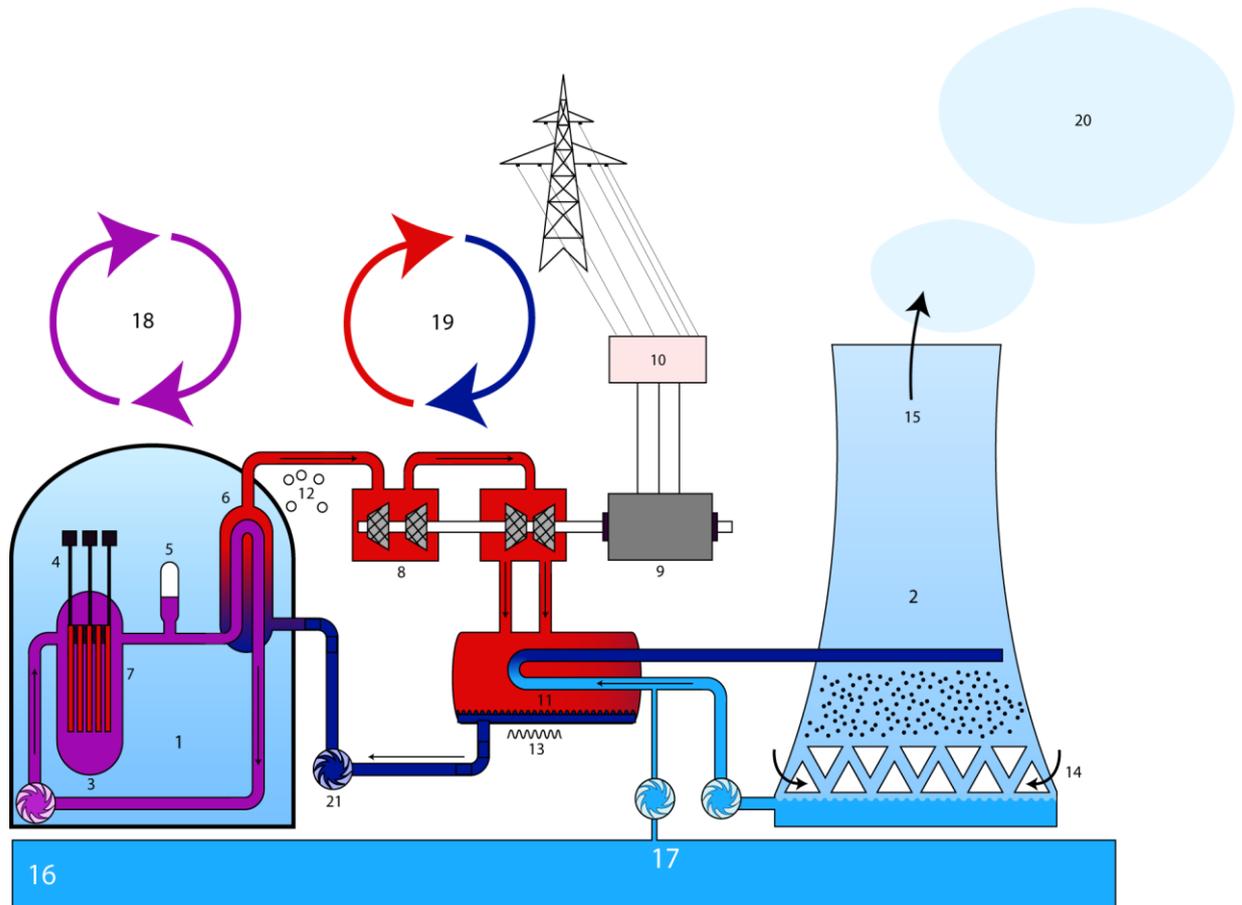
- El reactor nuclear, donde se produce la reacción de fisión nuclear
- El generador de vapor de agua (sólo en las centrales de tipo PWR)

⁵ En la Central Nucleoelectrica de Obninsk, Rusia, se generaron 5 MW, con sólo un 17% de rendimiento térmico.

- La turbina, que mueve un generador eléctrico para producir electricidad con la expansión del vapor
- El condensador, un intercambiador de calor que enfría el vapor transformándolo nuevamente en líquido.

A continuación se muestra detalladamente el funcionamiento básico de una central nucleoelectrónica.

- El reactor nuclear, un recipiente cerrado y aislado por gruesas paredes de hormigón, es el encargado de realizar la fisión de los átomos del combustible nuclear. Una combinación de refrigerante y moderador (agua corriente ligera) es presurizada hasta 150 atmósferas y bombeada a través del núcleo del reactor. La fisión produce calor que eleva la temperatura del agua refrigerante a 325°C hasta convertirse en vapor, liberando gran cantidad de energía calorífica por unidad de masa de combustible. Las barras de control (carburo de boro) absorben neutrones disminuyendo el número de fisiones dentro del reactor para evitar que este no explote.
- El generador de vapor es un intercambiador de calor que transmite calor del circuito primario, por el que circula el agua que se calienta en el reactor, al circuito secundario, transformando el agua en vapor de agua que posteriormente se expande en las turbinas.
- La turbina mueve un alternador que es el que genera la energía eléctrica. Un transformador aumenta la corriente de 25kV a 400kV antes de ser enviada a la red eléctrica.
- Después de la expansión en la turbina el vapor es condensado donde cede calor al agua fría refrigerante, que en las centrales PWR procede de las torres de refrigeración. Una vez condensada, vuelve al reactor nuclear para empezar el proceso de nuevo. Las centrales nucleoelectrónicas siempre están cercanas a un suministro de agua fría, como un río, mar o un lago, como es el caso de la CNLV, para el circuito de refrigeración.



Central nuclear con un reactor de agua a presión (PWR)

- 1- Edificio de Contención. 2- Torre de Refrigeración. 3- Reactor Nuclear. 4- Barras de Control. 5- Acumulador de Presión. 6- Generador de Vapor. 7- Combustible Nuclear. 8- Turbina. 9- Generador eléctrico. 10- Transformador. 11- Condensador. 12- Vapor. 13- Líquido Saturado. 14- Aire ambiente. 15- Aire húmedo. 16- Río. 17- Circuito de refrigeración. 18- Circuito primario. 19- Circuito secundario. 20- Emisión de aire húmedo (con vapor de agua).

Figura 1.2.2 Central Nucleoeléctrica con un reactor a presión (PWR) ⁶

⁶ Fuente: http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik_Energie.htm

1.4 Central Nucleoeléctrica “Laguna Verde” (CNLV)

Con la Certificación del organismo regulador mexicano la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas⁷ (CNSNS), la Secretaría de Energía (SENER) otorgó las licencias para Operación Comercial a la unidad 1 el 29 de Julio de 1990 y a la unidad 2 el 10 de Abril de 1995.

1.4.1 Ubicación

Se encuentra ubicada sobre la costa del Golfo de México en el km 42.5 de la carretera federal Cd. Cardel-Nautla, en la localidad denominada Punta Limón en el municipio de Alto Lucero, Estado de Veracruz, y cuenta con un área de 370 hectáreas. Geográficamente a 60 km al noreste de la ciudad de Xalapa, 70 km al noroeste del Puerto de Veracruz y a 290 km al noreste de la Ciudad de México.

1.4.2 Selección del Sitio

Es de excepcional importancia la adecuada selección del sitio en el que se localizará una central nucleoelectrica. Los cuatro criterios básicos que condujeron a la localización del sitio adecuado fueron:

- La relativa cercanía a los centros de consumo (especialmente la Cd. De México)
- La disponibilidad de agua de enfriamiento
- La estabilidad sísmica del lugar.
- Suelo rocoso para la cimentación de la construcción

1.4.3 Configuración de la Planta

La central consta de dos unidades, cada una con capacidad de 780 MWe,⁸ equipadas con reactores del tipo Agua Hirviente (BWR-5), y contenciones tipo MARK II de ciclo directo. El sistema nuclear de suministro de vapor fue adquirido a General Electric y el Turbogenerador a Mitsubishi Heavy Industries.⁹ Ambas unidades aportan aproximadamente el 4.51% de la energía generada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Cada unidad consta básicamente de siete edificios principales y otros secundarios. Los seis edificios principales son:

⁷ La CNSNS es el organismo nuclear regulatorio de México para autorizar operaciones y modificaciones en las unidades 1 y 2 de la CNLV.

⁸ Al principio, cada unidad empezó operando con 650 MWe, después se incremento su capacidad un 5%, es decir 682.44 MWe por cada unidad. Finalmente se incrementó, respecto a la capacidad original, en un 20%, teniendo con esto una capacidad de 780 MWe por cada unidad.

⁹ Publicaciones e información de CFE-GCN (Gerencia de Centrales Nucleoelectricas).

- *Edificio del Reactor:* Alberga en su interior al reactor nuclear, sus sistemas auxiliares y dispositivos de seguridad, la plataforma de recambio de combustible y la alberca de combustible gastado.
- *Edificio del Turbogenerador:* Aloja a las turbinas de alta y baja presión, generador eléctrico y su excitador, condensador, los precalentadores de agua de alimentación y recalentadores de vapor.
- *Edificio de Control:* Contiene al cuarto de control principal, computadora de proceso, cuarto de cables, los sistemas de aire acondicionado, bancos de baterías, laboratorios radioquímicos y el acceso del personal a la unidad.
- *Edificio de Generadores Diesel:* Aloja tres generadores diesel que se utilizan para el suministro de energía eléctrica a los sistemas de refrigeración del reactor, en situación de emergencia.
- *Edificio de Tratamiento de Residuos Radioactivos:* Aloja a los sistemas de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos de mediano y bajo nivel de radioactividad.
- *Edificio de la Planta de Tratamiento de Agua:* Contiene la planta de producción de agua desmineralizada de alta pureza, para uso en un ciclo de vapor. Edificio localizado en la Unidad 1.
- *Edificio del Sistema Integral de Información de Proceso:* Se localizan las computadoras del Sistema Integral de Información de Proceso, que proporciona en tiempo real los principales parámetros de planta, mediante reportes, gráficas y despliegues a color. Edificio localizado en la unidad 2.

Los edificios secundarios son:

- Edificio de obra de toma de agua de enfriamiento para el condensador y los componentes nucleares.
- La subestación Eléctrica
- Edificio técnico-administrativo
- Edificio de almacenamiento de partes de repuesto

1.5 Estudio de expansión de la CNLV

Hoy en día, con el crecimiento de la población en el país, el crecimiento en el número de industrias provocará una mayor demanda de energía eléctrica para satisfacer las necesidades de la gente, por ello es necesario pensar en un futuro cercano aumentar la capacidad de generación eléctrica del país. Aunado al crecimiento económico y poblacional es necesario pensar en la diversificación de las fuentes de energía primaria para la generación de energía eléctrica, con el fin de depender cada vez menos de los combustibles fósiles y de disminuir considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero.

En este estudio nos enfocaremos en la CNLV, en el aumento de su capacidad, estudiando los efectos que tendría la red eléctrica alrededor de la planta al llevar a cabo

esta tarea. El estudio se basa en tres tipos de reactores nucleares, ver las ventajas e implicaciones que tendría en la CNLV y la red eléctrica, con la operación de un reactor más en las instalaciones de la planta.