



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA UNA CENTRAL DE ENERGÍA
NUCLEAR EN HONDURAS

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
INGENIERA EN ENERGÍA

PRESENTADO POR:
21341068 NICOLE ALEJANDRA CANO JIMÉNEZ

ASESOR: PHD. ING.: HÉCTOR VILLATORO
CAMPUS SAN PEDRO SULA;

JUNIO DE 2019

AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN DEL AUTOR(ES) PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS DE GRADO.

Señores

CENTRO DE RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN (CRAI)

San Pedro Sula

Estimados Señores:

La presentación del documento de tesis forma parte de los requerimientos y procesos establecidos de graduación para alumnos de pregrado de UNITEC.

Yo, Nicole Alejandra Cano Jiménez, de San Pedro Sula del trabajo de grado titulado: Informe Final de Practica Profesional, presentado y aprobado en el año 2019, como requisito para optar al título de Profesional de Ingeniero en Energía, autorizo a:

Las Bibliotecas de los Centros de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), para que, con fines académicos, pueda libremente registrar, copiar y usar la información contenida en él, con fines educativos, investigativos o sociales de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en las salas de estudio de la biblioteca y la página Web de la universidad.

Permita la consulta y la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

De conformidad con lo establecido en el artículo 19 de la Ley de Derechos de Autor y de Derechos Conexos; los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Es entendido que cualquier copia o reproducción del presente documento con fines de lucro no está permitida sin previa autorización por escrito de parte de los principales autores.

DEDICATORIA

Esta obra se la dedico a mis padres y a mi abuela María Laura Hernández, sin ellos este logro no sería posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida, guiarme a lo largo de este camino y ser apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mis padres, Marlene Jiménez Cruz y Juan Carlos Cano Rodríguez por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he podido llegar hasta aquí.

A mi hermana Laurie Mariela Cano Jiménez por su cariño y apoyo incondicional. A mi abuela María Laura Hernández Cruz por sus consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona. A toda mi familia por sus oraciones, su inmenso apoyo y por acompañarme de una u otra forma en todos mis sueños y metas.

A mis amigos, en especial a Alejandra Vásquez, Joseph Fuentes, David Bueso, Cantalicio Paz, y Elvis Rodríguez por brindarme su apoyo en mi vida universitaria.

A mi asesor de tesis Ing. Héctor Villatoro por la orientación y ayuda que me brindo.

A mis catedráticos por sus enseñanzas, su dedicación y su tiempo.

ÍNDICE

ÍNDICE	ii
I. INTRODUCCION.....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Definición del problema	3
1.3 Preguntas de Investigación.....	3
1.4 Hipótesis	4
1.4.1 Variables de Investigación	4
1.5 Justificación.....	4
III. OBJETIVOS.....	5
3.1 Objetivo General.....	5
3.2 Objetivos Específicos.....	5
IV. MARCO TEORICO.....	6
4.1 Energía Nuclear.....	6
4.2 Componentes de Una Central Nuclear de Energía.....	7
4.3 Tipos de Reactores Nucleares.....	8
4.4 Residuos Radioactivos	10
4.4.1 Clasificación de los Residuos Radiactivos	10
4.5 Costos de Operación de una Planta Nuclear	11
4.6 Costo de Generación de Energía	12
4.7 Flujo de Caja	13

4.8	Tasa Interna de Retorno.....	13
4.9	Valor Actual Neto	13
4.10	Marco Legal	13
4.10.1	Ley Marco Del Subsector Eléctrico.....	13
4.10.2	Ley Sobre Actividades Nucleares y Seguridad Radiológica	13
4.10.3	Reglamento para la Gestión de Desechos Radiactivos.....	14
V.	METODOLOGIA	15
5.1	Reactores Nucleares más Utilizados.....	15
5.2	Ventajas y desventajas de un reactor BWR	15
5.3	Ventajas y desventajas de un reactor PWR.....	16
5.4	Estudios y permisos ambientales para la construcción de una central nuclear.....	18
5.5	Localización de la Central Nuclear	18
5.6	Percepción de las centrales nucleares por la población hondureña.....	19
5.7	Calculo de LCOE.....	19
5.8	Calculo de Emisiones de CO ₂ por Generadora de Energía Térmica	21
VI.	ANALISIS DE RESULTADOS	22
6.1	Selección del reactor	22
6.2	Características del reactor	23
6.2.1	Características Básicas del Reactor VBER-300	23
6.2.2	Características Técnicas del Reactor.....	24
6.2.3	Contención.....	25
6.3	Costo de la Energía Nuclear	26

6.3.1	Costo de Inversión	26
6.3.2	Costo de Operación y Mantenimiento.....	27
6.3.3	Precio del Combustible	27
6.3.4	Energía Generada	28
6.3.5	TIR y VAN.....	29
6.4	Localización de la Planta Nuclear	30
6.5	Marco Ambiental	31
6.5.1	Impacto Ambiental	31
6.5.2	Gestión de los residuos radiactivos.....	31
6.5.3	Desmantelamiento de una central nuclear.....	32
6.5.4	Documentación para Construcción	32
6.5.5	Estudios Ambientales.....	33
6.5.6	Reducción de Emisiones de CO ₂	34
6.6	Percepción Social de la Energía Nuclear en Honduras	34
VII.	Conclusiones y Análisis	36
7.1	Conclusión General.....	36
7.2	Conclusiones Específicas.....	36
VIII.	RECOMENDACIONES.....	38
8.1	Recomendación General.....	38
8.2	Recomendaciones Específicas	38
IX.	Bibliografía.....	39
X.	Anexos	42

10.1	Residuos Radiactivos de una Planta Nuclear	42
10.2	Zonas con Alto Riesgo de Sismos en Honduras.....	43
10.3	Ríos de Honduras	43
10.4	Distribución de Volcanes en América Central	44
10.5	Encuesta "Percepción de la energía nuclear en Honduras"	45
10.6	Respuesta Pregunta número uno de la Encuesta	45
10.7	Preguntas Número dos de la Encuesta	46
10.8	Pregunta Número cinco de la Encuesta.....	46
10.9	Pregunta Número seis de la Encuesta	47
10.10	Pregunta Número siete de la Encuesta	47
10.11	Datasheet del Reactor	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Matriz Energética de Honduras	2
Ilustración 2: Partes de una Central Nuclear	7
Ilustración 3: Reactor BWR	16
Ilustración 4: Reactor PWR	17
Ilustración 5: Características Técnicas de un Reactor VBER-300	24
Ilustración 6: Contención del reactor	25
Ilustración 7: Precio del Uranio 2010-2018	27
Ilustración 8: Localización de la Planta Nuclear	30
Ilustración 9: Zonas con Riesgo de Sismo en Honduras	43
Ilustración 10: Ríos de Honduras	43
Ilustración 11: Volcanes en América Central	44
Ilustración 12: Resultado a pregunta número uno de la encuesta	45
Ilustración 13: Resultado pregunta número dos de la encuesta	46
Ilustración 14: Respuesta pregunta numero cinco de la encuesta	46
Ilustración 15: Resultado Pregunta Número Seis de la Encuesta	47
Ilustración 16: Resultado de la pregunta número siete	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características básicas del reactor VBER-300	23
Tabla 2: Características Técnicas de un Reactor VBER-300	24
Table 3: Protección Contra Impactos Externos y Causados por el Hombre del Reactor	26

Table 4: Costo de Inversión para la central nuclear	26
Tabla 5: Premisas Básicas del proyecto	28
Table 6: Calculo de LCOE de la Generadora Nuclear de 325 MW	29
Table 7: TIR y VAN del Proyecto	29
Table 8 Cantidad de kg de CO₂ por kWh	34
Table 9 Ahorro de Emisiones de CO₂ kg/kWh	34
Tabla 10: Porcentaje de Residuos Radiactivos en una Planta Nuclear	42

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Formula LCOE	19
---------------------------------------	----

GLOSARIO

- Energía nuclear: es la que se libera espontánea o artificialmente en las reacciones nucleares. ("Energía nuclear - Twenergy," n.d.)
- Reactor nuclear: es un dispositivo en donde se produce una reacción nuclear en cadena controlada. Se puede utilizar para la obtención de energía en las denominadas centrales nucleares. (Nuclear, n.d.-b)
- Light water reactor: (LWR) utilizan como refrigerante y moderador el agua. Como combustible uranio enriquecido. ("Introduction To Light Water Reactors," n.d.)
- Isótopo: átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en número másico. ("Isótopo," n.d.)
- Neutrón: es una partícula subatómica, un nucleón, sin carga neta, presente en el núcleo atómico de prácticamente todos los átomos, excepto el protio. ("Definición de neutrón - Qué es, Significado y Concepto," n.d.)
- Uranio 235: es el único isótopo fisible, es decir, con capacidad para provocar una reacción en cadena de fisión nuclear, presente en la naturaleza. ("Climántica:: El uranio 235," n.d.)
- Fisión nuclear: una reacción nuclear que tiene lugar en el núcleo atómico. La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos más pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa y beta. ("Fisión nuclear - CSN," n.d.)
- Radioactividad: es un fenómeno físico por el cual los núcleos de algunos elementos químicos, llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas radiográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, entre otros (User, n.d.)
- Residuo radioactivo: son residuos que contienen elementos químicos radiactivos que no tienen un propósito práctico. Es frecuentemente el subproducto de un proceso nuclear, como la fisión nuclear. (Nuclear, n.d.-a)

I. INTRODUCCION

La presente investigación analiza el beneficio de introducir a la matriz energética hondureña una central de energía nuclear de 325 MW en el departamento de Olancho. Una central de energía nuclear de 325 MW podría sustituir un 33% de la generación de energía que están produciendo actualmente las generadoras térmicas, estas generadoras junto a las hidroeléctricas son las que están cubriendo actualmente las horas de mayor demanda energética que son en horario nocturno.

El reactor seleccionado para instalar fue un reactor de agua a presión VBER-300 de origen ruso. La localización de la central nuclear sería en el departamento de Olancho, ya que este es el único departamento de Honduras que cumple todos los requisitos geográficos para la instalación de una central nuclear. El estudio técnico-económico de la central muestran un costo de generación de energía de \$0.02/kWh y un payback en 9 años. Con una central de energía nuclear en Honduras se estima que el ahorro anual de CO₂ sería de **1,286.945 kg/GW**.

El mayor obstáculo presentado en este estudio es la percepción actual de la población hondureña hacia las centrales nucleares. La mayoría de los hondureños encuestados mostraron bastante temor antes los posibles accidentes nucleares y el tratamiento de desechos radiactivos.

La presente investigación se divide en las secciones a continuación,

El capítulo II, contiene el planteamiento del problema, podremos conocer como esta estructurada la matriz energética de Honduras y cual es su mayor consumidor de energía. En el capítulo III se definen y plantean los objetivos de la investigación. El capítulo IV proporciona la teoría básica necesaria para la comprensión de la metodología. El capítulo V contiene la metodología y detalla los criterios utilizados para responder las preguntas de investigación que se utilizaron para la obtención de resultados del capítulo VI. El capítulo VI contiene los resultados de las preguntas de investigación. En los siguientes capítulos están las conclusiones y recomendaciones aplicados de la investigación

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

Actualmente todo el mundo está experimentando los graves efectos del desequilibrio climático, este se debe a un exceso de emisiones de CO₂ emisiones de dióxido de carbono. El desarrollo económico y consumo energético son los más grandes factores que están alterando el equilibrio climático. La matriz energética de Honduras tiene instalada 2,687.4 MW, según información suministrada por la ENEE en octubre 2018, 64.3% de la matriz energética de Honduras viene de fuentes renovables, el restante porcentaje les pertenece a las generadoras térmicas, lo que equivale a 959.40 MW (Prensa, 2018).

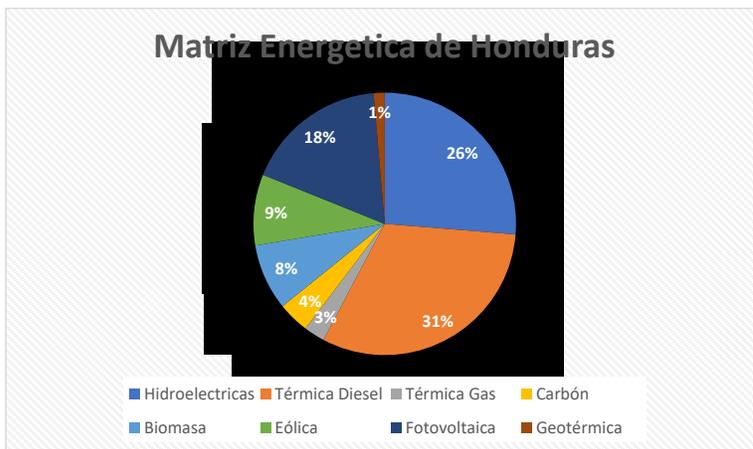


Ilustración 1: Matriz Energética de Honduras

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la ENEE

Honduras le ha apostado fuertemente a las energías renovables pero el mayor consumidor de energía en Honduras es el sector residencial, el cual hace su mayor consumo en las horas de la noche. Un perfil de carga realizado por la ENEE muestra que la mayor demanda de energía en

el 2017 fue el 3 de abril a las 7:05 pm y en el 2018 fue en 24 de abril a las 7:08 pm. (Rodriguez, 2019). Las horas de mayor demanda son cubiertas por las generadoras térmicas e hidráulicas.

Honduras teniendo una matriz energética mayoritariamente renovable en el 2017 las emisiones de CO₂ en aumentaron 200 kilo toneladas, un 1.93% respecto a 2016. (Macro, Honduras- Emisiones de CO₂, 2017). Esto nos indica el poco progreso que ha tenido Honduras en disminuir las emisiones de CO₂ debido a que las térmicas siguen teniendo gran importancia para cubrir la demanda de Honduras.

La energía nuclear no genera emisiones de CO₂ directas y es una fuente de energía que puede ser considerada como potencia firme. La energía nuclear obtiene su energía de un proceso físico, la fisión nuclear del átomo de uranio. Esto quiere decir que una central de este tipo no envía a la atmósfera gases de efecto invernadero ni otros productos de combustión, tales como cenizas, que contribuyen al cambio climático, contaminación de ciudades, destrucción de la capa de ozono o al efecto invernadero. También debe considerarse los aspectos negativos de la energía nuclear como lo son el alto costo de inversión, los desechos radiactivos y los accidentes nucleares.

1.2 Definición del problema

El consumidor más grande de energía en Honduras es el sector residencial, su mayor consumo es en las horas de la noche. Esta demanda está siendo cubierta por las generadoras térmicas, creando un escenario donde difícilmente se pueda desligar de estas generadoras y las emisiones de CO₂ siguen aumentando y afectando a la población hondureña. Esta investigación pretende introducir la generación de energía nuclear a la matriz energética de Honduras para remplazar a las generadoras térmicas y disminuir las emisiones de CO₂.

1.3 Preguntas de Investigación

1. ¿Cuál sería la factibilidad técnica- financiera de una central nuclear en Honduras?
2. ¿Una central de energía nuclear sería rentable en Honduras?
3. ¿Cuál sería la TIR y VPN del proyecto?

4. ¿En cuánto tiempo se podría recuperar la inversión del proyecto?
5. ¿Cuál sería la reducción de dióxido de carbono emitido a la atmósfera si se sustituyen 325 MW de energía térmica por energía nuclear?
6. ¿Cuál es la percepción actual de la población hondureña acerca de las plantas nucleares?

1.4 Hipótesis

¿Podrá una central nuclear de energía de 325 MW ser rentable en Honduras?

1.4.1 Variables de Investigación

1. Costo del combustible
2. LCOE
3. TIR
4. VAN
5. Tiempo de Retorno de la Inversión

1.5 Justificación

La presente investigación nace como iniciativa en demostrar que las centrales nucleares pueden tomar el lugar de las térmicas en Honduras. La matriz energética hondureña tiene un alto porcentaje de energía renovable pero no cubre la demanda pico puesto que esta es en las horas de la noche. Esto crea un escenario donde difícilmente Honduras pueda desligarse de las generadoras térmicas y siempre seguirán aumentando las emisiones de CO₂. En muchos países con grandes demandas energéticas se ha implementado de forma segura y eficiente el uso de la energía nuclear como fuente alternativa de generación eléctrica, el costo de generación de energía nuclear es de 0.023 ct/kWh a largo plazo se convierte en una opción económicamente viable y amigable con el medio ambiente.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Realizar un estudio de prefactibilidad de una planta nuclear en Honduras, tomando en consideración los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar cuál reactor nuclear sería el más conveniente para una central nuclear de energía.
- Determinar el costo nivelado de la electricidad (LCOE).
- Determinar la localización óptima para una central nuclear de energía
- Investigar qué permisos ambientales se necesitan para una generadora de energía nuclear y cuál sería el tratamiento de desechos radioactivos
- Evaluar cuál es la percepción actual que tiene la población hondureña hacia las centrales nucleares.
- Determinar cuánto bajarían las emisiones de CO₂ implementando una central nuclear.

IV. MARCO TEORICO

La presente investigación se centra en presentar una propuesta para la implementación de una central nuclear en Honduras. Esta tecnología ha sido aplicada exitosamente en otros países, pero en Honduras es ignorada o refutada. Se presentarán los pros y los contras de este tipo de energía, se describirá de manera sencilla y argumentada cada uno de sus aspectos. Se explicará el proceso de transformación de energía, desde la reacción nuclear hasta la generación eléctrica; teniendo en consideración los costos de implementación y operación, impactos a nivel social, ambiental y análisis de ingeniería básica de los equipos.

4.1 Energía Nuclear

La energía nuclear es la energía interna en el núcleo atómico, la parte central de un átomo. Existen dos maneras en que se puede aprovechar la energía presente en el núcleo: fisión y fusión nuclear.

La fisión nuclear es la división de un átomo en diferentes partículas más pequeñas. Esta reacción genera un proceso exotérmico que puede aprovecharse para la generación de energía. Una de las características de la fisión nuclear es que se genera bombardeando un átomo inestable con un neutrón. Una vez que el núcleo se ha fisionado, uno o dos neutrones quedan libres que pueden chocar con otro átomo y generar una reacción en cadena. Actualmente la fisión nuclear es el tipo de reacción nuclear que se usa en todos los tipos de reactores nucleares.

La fusión nuclear es el proceso inverso, se somete el núcleo de dos átomos a unas condiciones físicas en las que los núcleos se fundan entre ellos y se pueda obtener un solo átomo. Esta es la energía que produce el sol. Actualmente no se ha logrado replicar de forma artificial y sostenida la fusión nuclear a nivel comercial.

Se le llama combustible nuclear al material que se utiliza para generar las reacciones nucleares. Para la fisión nuclear se necesita un átomo que sea muy inestable, la mayoría de los reactores nucleares utilizan el uranio como combustible nuclear; se usa el isótopo 235 (U-235). El uranio se encuentra de forma natural, a pesar de ser inestable se somete a un proceso de enriquecimiento, el contenido porcentual de U-235 en el uranio natural se incrementa gracias al

proceso de separación de isótopos, que lo convierte en un material más fisionable, por lo tanto, más eficiente. Suele hallarse casi siempre junto a rocas sedimentarias. Hay depósitos importantes de este mineral en Norteamérica, África y Australia. (Prim, n.d.) Las reservas de uranio del planeta no son consideradas ilimitadas por lo cual la energía nuclear no se considera una energía renovable.

El uranio que se usará en el reactor se prepara en pequeñas pastillas de dióxido de uranio de unos milímetros. Estas pastillas se ponen en varillas de 4 metros de largo y se reúnen en grupos de 50- 200 varillas.

4.2 Componentes de Una Central Nuclear de Energía

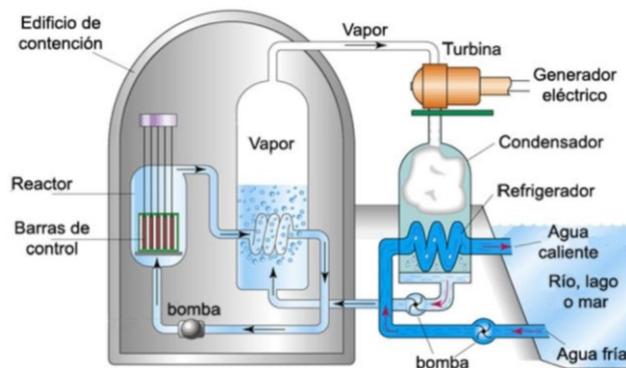


Ilustración 2: Partes de una Central Nuclear

Fuente: ("PARTES DE UNA CENTRAL NUCLEAR - centrales nucleares," n.d.)

Existen varios tipos de centrales nucleares, pero muchas de ellas tienen las mismas características. Algunos componentes que muchas de ellas comparten son:

- Combustible: Mayormente muchas centrales utilizan el U-235 como combustible, este es arreglado en pastillas que son puestas en varillas de 4 metros de largo y se reúnen en grupos de 50-200 varillas.

- Reactor: Es la parte central donde se produce la fisión de los átomos de uranio.
 - Barras de control: Se encuentran en el reactor, son fabricadas con materiales absorbente de neutrones, como cadmio o boro. Se insertan o retiran del núcleo para controlar la velocidad de reacción o para retenerla.
 - Turbinas: Son las encargadas de mover el generador para producir electricidad.
 - Generador: Es el encargado de producir la electricidad.
- Condensador: El encargado de condensar el vapor que se encarga de mover la turbina para que pueda volver a ser utilizado.
- Torres de Refrigeración: Se encargan de mantener la temperatura del condensador, garantizando el correcto funcionamiento de la central. El agua que refrigera el condensador es enfriada en las torres de enfriamiento al entrar en contacto con el aire frío que circula a través de ellas.
 - Contenedor: La estructura alrededor del reactor y generadores de vapor, estos están diseñados para protegerlos de cualquier intruso y proteger a los elementos de afuera de los efectos de la radiación en caso de una falla grave. Es típicamente una estructura de hormigón y acero de un metro de espesor.

4.3 Tipos de Reactores Nucleares

Los reactores nucleares están basados en el uso de energía térmica generada por una reacción de fisión nuclear. Los reactores son mayormente utilizados para la generación de electricidad en plantas de energía nuclear. Otro uso que tienen estos reactores es para desalinización de agua de mar, calefacción o para sistemas de propulsión. La diferencia entre los tipos de reactores es cómo funciona el reactor que usan para producir electricidad.

Algunos tipos de reactores nucleares son:

1. Reactor de agua a presión (Pressurized Water Reactor PWR): En este tipo de reactores, el agua refrigerante, que se encuentra a alta presión y temperatura, conduce la energía proveniente del núcleo hacia un intercambiador de valor, en donde se genera vapor de agua que servirá como fluido para accionar una turbina. (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)
2. Reactor de agua en ebullición (Boiling Water Reactor BWR): A diferencia de los PWR, en un reactor de agua en ebullición, el agua que pasa por el núcleo se deja hervir a una presión moderada, y una vez es extraída el calor, puede utilizarse directamente en el ciclo de vapor. (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)
3. Reactores de alta temperatura enfriados con gas (High-temperature gas-cooled reactor HGR): Estos reactores usan como refrigerante gas helio, y una mezcla de grafito y uranio como combustible. Dado que el punto de sublimación de grafito es extremadamente alto y el helio es químicamente inerte, los HGTR son capaces de operar a muy altas temperaturas (alrededor de los 900 °C). (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)
4. Reactores de agua pesada (Heavy Water Reactor HWR): Se modera y enfría con agua pesada, por lo cual, puede utilizar uranio natural como combustible, ya que el D_2O no es un buen absorbente de neutrones. (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)
5. Reactor de metal líquido o reactor reproductor rápido (Fast Breeder Reactor FBR): Son enfriados con sodio líquido y emplean como combustible uranio natural. La característica más importante que podría diferenciar a un reactor reproductor rápido del resto es que su núcleo consta de dos zonas; una en donde se llevan a cabo las reacciones en cadena (zona fisiónable), y otra en donde se produce nuevo combustible (zona fértil). En esta última, el uranio-238 transmuta a plutonio, lo que

permite la creación de mayor cantidad de materia físil de la que se consume, de ahí el nombre "Reactor reproductor rápido". (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)

6. Reactor avanzado refrigerado por gas (Advanced Gas-cooled Reactor AGR): Esta clase de reactores se ha desarrollado en Reino Unido desde la década de los 60. Son alimentados con dióxido de uranio levemente enriquecido. Utilizan grafito como moderador, y dióxido de carbono como refrigerante. Al igual que los HTGR, operan a una temperatura elevada, con lo cual obtienen mayores rendimientos (38%-49%) que los reactores ya mencionados. (UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, n.d.)

4.4 Residuos Radioactivos

La generación de electricidad en una central nuclear se produce mediante la división de átomos de uranio. El uranio utilizado como combustible en una planta nuclear se forma en bolitas de cerámica del tamaño de la punta de un dedo meñique. Ciertos cambios tienen lugar en los gránulos de combustible de cerámica durante su tiempo en el reactor de la central. Las partículas que quedan después de la división del átomo son radioactivas. El combustible permanece en el reactor hasta que los fragmentos de fisión atrapados comienzan a reducir la eficiencia de la reacción en cadena. Algunos de los productos de fisión son varios isótopos de bario, estroncio, cesio y yodo. Los productos de fisión y el plutonio y uranios remanentes permanecen dentro del combustible gastado cuando se retira del reactor y se denomina residuos de alto nivel ya que son extremadamente calientes.

4.4.1 Clasificación de los Residuos Radiactivos

Existen tres clasificaciones principales para los residuos radiactivos:

1. Residuos de baja y Media Actividad (RBMA): Son los residuos que reducen su radioactividad a la mitad en menos de 30 años. Normalmente suelen ser

herramientas, ropa de trabajo, y otros materiales utilizados en algunas industrias, hospitales, laboratorios de investigación y centrales nucleares. (Nuclear, n.d.)

Características distintivas:

- Emisores beta-gamma
 - Emisores alfa en concentraciones muy bajas
 - Periodo de desintegración menor de 30 años
 - No generan calor.
2. Residuos de muy baja actividad (RBBA): Estos decaen tras un periodo temporal de almacenamiento inferior a 5 años, después del cual son declarados exentos. (Nuclear, n.d.)
3. Residuos de Alta Actividad (RAA): Básicamente son construidos por el combustible gastado en los reactores nucleares y por otros materiales con niveles elevados de radiactividad. (Nuclear, n.d.)

Características distintivas:

- Emisores alfa en concentraciones apreciables
- Periodo de semidesintegración mayor a 30 años
- Pueden generar calor.

4.5 Costos de Operación de una Planta Nuclear

La energía nuclear tiene un costo competitivo con otras formas de energía a menos que se pueda conseguir de manera directa combustibles fósiles de bajo costo. Sobre una base nivelada, la energía nuclear es una fuente económica de generación de electricidad, que combina las ventajas de seguridad, confiabilidad y muy bajas emisiones de gases de efecto invernaderos. El

costo operativo de estas plantas es más bajo que casi todos los competidores de combustibles fósiles, con un riesgo muy bajo de inflación de costos operativos. Se espera que las plantas puedan operar 60 años e incluso más en el futuro.

La economía de la energía nuclear implica la consideración de varios aspectos:

- Costos de capital: Incluye el costo de la preparación del sitio, la construcción, fabricación, puesto en marcha y financiamiento de una planta de energía nuclear. Para comparar las diferentes tecnologías de generación de energía, los costos de capital se expresan en términos de la capacidad generación de la planta, \$/kW. El costo de capital de la energía nuclear es de puede ser entre \$3,500/kW hasta \$5,500/kW. ("Nuclear Power Economic Costs," n.d.)
- Costos operativos: Estos incluyen el costo del combustible y de la operación y mantenimiento (O&M). Las cifras de costo de combustible incluyen la gestión del combustible usado y la eliminación final de residuos.
- Costos externos: Estos costos no están incluidos en la construcción y operación de ninguna planta de energía, y no son pagados por el consumidor de electricidad, sino por la comunidad en general. Son los que vienen en relación con la salud y el medio ambiente, y que son cuantificables, pero no están integrados en el costo de la electricidad.
- Otros costos: Con el fin de proporcionar un suministro eléctrico confiable, se debe prever la generación de respaldo en momentos en que la planta de generación no esté funcionando. Los costos incurridos en la provisión de instalaciones de respaldo, transmisión y distribución se conocen como costos del sistema.

4.6 Costo de Generación de Energía

Es un método que permite comparar las distintas energías, es utilizado para evaluar las opciones en el mercado eléctrico (Heisig, 2016).

4.7 Flujo de Caja

El flujo de caja hace referencia a las entradas y salidas netas de dinero que tiene un proyecto. Esto permite ver la liquidez de un proyecto. (Kiziryan, 2018)

4.8 Tasa Internar de Retorno

La tasa interna de retorno (TIR) es la rentabilidad promedio de un determinado proyecto durante su vida. Se recomienda hacer un proyecto si su TIR es mayor a la tasa de descuento. (Reyes, 2019)

4.9 Valor Actual Neto

Es un criterio que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto para conocer cuánto se ganará o perderá en la inversión. (Morales, 2018)

4.10 Marco Legal

El país de Honduras la generación de energía eléctrica está regida principalmente por la ley del marco del subsector eléctrico. Honduras también cuenta con la ley sobre actividades nucleares y seguridad radiológica y el reglamento para la gestión de desechos radiactivos.

4.10.1 Ley Marco Del Subsector Eléctrico

Esta ley fue aprobada el 26 de noviembre del 1994 bajo el decreto número 15894, la ley nace debido a que la ENEE no podía controlar y regular la creciente demanda energética que afrontaba el país. Esta ley liberalizo el mercado para las generadoras privada y la ENEE podría regular la parte de generación, transmisión y distribución de la energía.

4.10.2 Ley Sobre Actividades Nucleares y Seguridad Radiológica

Esta ley fue aprobada el 14 de noviembre del 2009, tiene como objeto regular y controlar las actividades de la energía nuclear en sus diferentes campos y prevenir cualquier accidente nuclear

4.10.3 Reglamento para la Gestión de Desechos Radiactivos

Este reglamento fue emitido el 20 de octubre del 2015 y clasifica los tipos de desechos radiactivos y el tratamiento que estos recibirán.

V. METODOLOGIA

En la selección del reactor se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: primero se tomó en cuenta qué tipo de reactor sería más eficiente y seguro. En este caso se escogió un reactor PWR. Luego se buscó un reactor PWR con una baja potencia, la mayoría de los reactores nucleares generan más de 1,000 MW) Se hizo un estudio de todos los costos de una central nuclear para poder sacar el LCOE. Para conocer los permisos y estudios ambientales que requiere una central nuclear se entrevistó a la Ing. Alejandra Ramírez y también se realizó una encuesta para conocer la percepción de las centrales nucleares en Honduras a 200 personas.

5.1 Reactores Nucleares más Utilizados

Los reactores más utilizados son los LWR (Light Water Reactors) en esta categoría entran los ya comentados BWR y PWR. Este tipo de reactor utiliza agua para su enfriamiento, la diferencia más importante entre un BWR y PWR es que en un reactor BWR el agua hace ebullición en su interior y se convierte en vapor, a través de un proceso complejo de secado del vapor, esta va directo a la turbina. En los reactores PWR el agua alrededor del núcleo nunca hace ebullición, se mantiene a presión y temperaturas altas para poder transportar la mayor cantidad de calor hacia otro circuito llamado secundario a través de un intercambiador de calor agua/agua, en el circuito secundario el agua hace ebullición y va a la turbina como vapor.

5.2 Ventajas y desventajas de un reactor BWR

Algunas de las ventajas de un reactor de ebullición son:

- El combustible nuclear que utiliza son óxidos de uranio enriquecido entre el 2% y el 4%
- No utiliza generadores de vapor ni compensadores de presión
- Temperaturas de funcionamientos más bajas
- El primer circuito del reactor funciona a una presión de 70 atmósferas contra 160 atmósferas que utiliza el PWR.

Algunas desventajas que presenta el reactor de ebullición son:

- Imposible recargar el combustible sin parar el reactor
- Se necesita una vasija de reactor aproximadamente dos veces más en volumen que la de un PWR.
- Difícil fabricación y transportación
- Contaminación de la turbina con productos de activación de agua: N-17 de vida corta y tritio.

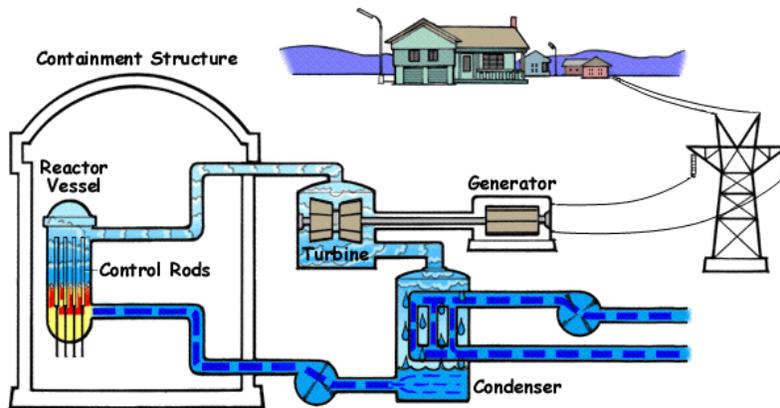


Ilustración 3: Reactor BWR

Fuente: ("NRC: The Student Corner: Multimedia: Animated Images of Plants PWR and BWR," n.d.)

5.3 Ventajas y desventajas de un reactor PWR

Algunas ventajas de un reactor PWR son:

- Mas fáciles de operar en condiciones estables, producen menos energía a medida que aumentan las temperaturas.

- Pueden operar con un núcleo que contiene menos material fisible del que se requiere para que sean críticos.
- Su diseño es relativamente seguro contra accidentes críticos
- Pueden usar agua liviana como moderador
- El ciclo de la turbina está separado del ciclo principal
- Tiene una alta densidad de potencia

Algunas desventajas de un reactor PWR son:

- El agua refrigerante debe estar fuertemente presurizada para que permanezca líquida a altas temperaturas
- Requiere tuberías de alta resistencia y un recipiente de alta presión
- Muchos reactores no pueden reabastecer combustible estando en operación
- El ácido bórico es corrosivo para el acero carbono (hace que circulen productos corrosivos radiactivos en el circuito primario y limita la vida del reactor)

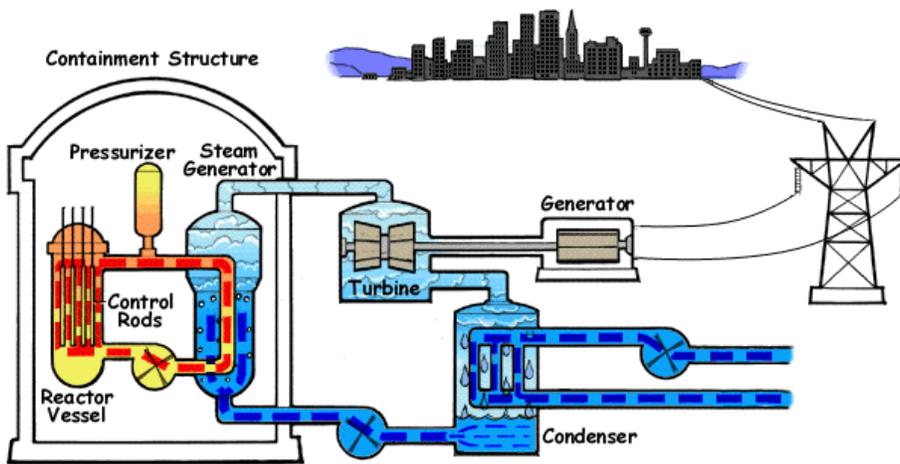


Ilustración 4: Reactor PWR

Fuente: ("NRC: The Student Corner: Multimedia: Animated Images of Plants PWR and BWR," n.d.)

5.4 Estudios y permisos ambientales para la construcción de una central nuclear

Para conocer los estudios y permisos ambientales que se necesitan para una central nuclear se entrevistó a la ingeniera ambiental Alejandra Ramírez. Ella nos indicó que los requerimientos para la construcción de una central nuclear ya están establecidos por la DECA (Dirección General y Control Ambiental). Estos permisos se pueden encontrar en la página de Mi Ambiente

5.5 Localización de la Central Nuclear

Hay algunos requerimientos que determinan si una ubicación es factible para la instalación de una central nuclear.

1. Condiciones sísmicas: Las centrales nucleares tienen una vida de 50-60 años una vez que se han construido. Si ocurriera un terremoto masivo la vida de la planta podría disminuir y también este escenario podría ocasionar un accidente nuclear, como fue el caso de Fukushima.
2. Cercanía a un cuerpo de agua: La central nuclear es básicamente una central eléctrica de turbina de vapor. Este tipo de planta de energía requiere una gran cantidad de agua para la refrigeración. Un reactor nuclear requiere de 400 galones de agua por MWh (Styles III, 2017).
3. Actividad Volcánica: Debido a que Honduras se encuentra cerca de muchos países que tienen volcanes activos, la localización de la central nuclear deberá ser en un punto donde se no se corra riesgo de un accidente debido a una erupción volcánica. (Montes, 2019)

5.6 Percepción de las centrales nucleares por la población hondureña

Para conocer cuál es la percepción de las centrales nucleares en Honduras se realizó una encuesta. Con esta encuesta no solo se quiere saber cuál es la percepción que tiene la población hondureña de las centrales nucleares si no también cuáles estigmas pueden tener y cuál es su conocimiento actual acerca de ellas.

5.7 Calculo de LCOE

Para verificar la viabilidad económica de una central nuclear comparada con otras tecnologías analizamos lo que es el LCOE, "Levelized Cost of Electricity". Este incluye la inversión para su construcción, costos de operación, y mantenimiento, costo de combustible y el costo de capital. Se mide generalmente en US\$/MWh.

Para calcular el costo de generación de energía se utiliza la siguiente formula:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Costo de inversión} + (\text{O\&M} \times \text{Vida Util de la Planta}) + (\text{CC} \times \text{Vida Util de la Planta})}{\text{EG} \times \text{Vida Util de la Planta}}$$

Ecuación 1: Formula LCOE

Fuente: Ing. Alicia Reyes

Donde:

- Costo de inversión [US\$]:

El costo de inversión de una generadora nuclear es de 5,078 \$/kW, hay que tener claro el tiempo de construcción. El costo de capital es los proyectos nucleares es muy alto y pequeños errores que puedan atrasar la obra generan grandes variaciones en los

costos de generación por MWh, este es el punto mas delicado al momento de hacer una evaluación de un proyecto de energía nuclear. (Daniel Charlín, 2009)

- O&M= Costo de Operación y Mantenimiento [US\$]

Estos costos son difíciles de estimar debido a que dependen fuertemente del país donde está localizada la central. Este costo con el ciclo del combustible son los costos variables. Para este estudio se tomó el costo de O&M de \$103.31 /kW/año.

- CC=Costo del combustible [US\$]

El costo del combustible se divide en el costo del mineral, servicios de conversión, enriquecimiento del combustible y fabricación de combustible. En algunos lugares aquí se añade el tratamiento del combustible gastado y en otros lo incluyen dentro del costo de mantención y operación. El costo de una libra de uranio para junio 2019 es \$24.30.

- EG= Energía Generada en el año [MWh]

Esta energía se obtiene de multiplicar el factor de planta, con la potencia y las horas que hay en un año. El factor de planta cuenta un factor altamente importante ya que con este se estima la generación anual de la planta.

- Costo de la Energía (LCOE)

Para ver la factibilidad de una planta nuclear se compara el LCOE de una planta nueva con las distintas tecnologías, en este caso serían las de generadoras térmicas pues serían las que la central nuclear pretende reemplazar.

La vida útil de las plantas nucleares se estima entre 40 a 60 años.

5.8 Cálculo de Emisiones de CO₂ por Generadora de Energía Térmica

Para calcular cuánto CO₂ emite una generadora térmica es necesario saber la tasa de calor de cada combustible, esto se mide viendo el porcentaje de eficiencia que tiene cada combustible para poder generar 1 kWh. El carbón tiene una eficiencia del 33.6%, el petróleo 25.5-33.33% y el gas natural de 29.4-44.8%. ("How much fuel is required to produce electricity," n.d.). La eficiencia térmica de un reactor nuclear PWR es de un 33%-37%. (IEA, 2016).

Honduras cuenta con 808.6 MW de energía térmica Diesel, 66.5 MW de gas natural y 99.8 MW de carbón. La cantidad de CO₂ que emite cada tipo de generadora térmica por kWh generado es:

1. Carbón: 1.142 kg de CO₂ por kWh generado de energía.
2. Gas natural: 0.20 kg de CO₂ por kWh generado de energía.
3. Diesel: 0.27 kg de CO₂ por kWh generado de energía (Quaschnig, n.d.)

Las centrales nucleares no generan emisiones de CO₂ para la producción de energía eléctrica.

VI. ANALISIS DE RESULTADOS

Para la instalación de una central nuclear se eligió un reactor de agua a presión (PWR: Pressurized Water Reactor) es un tipo de reactor que utiliza el agua como refrigerante y moderador de neutrones. Se eligió el modelo VBER-3000 elaborado por la empresa rusa JSC "OKBM Afrikantov" de 5 bucles con una potencia de 325 MW.

6.1 Selección del reactor

Pará la instalación de un reactor nuclear en Honduras se sugiere utilizar un reactor de agua a presión estos son muy estables debido a su tendencia a reducir su potencia ante incrementos de temperatura. Pueden ser operados con un núcleo que contiene menos material fisible que el necesario para alcanzar la condición de criticidad con neutrones instantáneos. Reduce la posibilidad que del reactor tenga una subida incontrolada de potencia y es una de las características de seguridad de este reactor.

La mayoría de los reactores nucleares son diseñados para producir alrededor de 1,000-1,300 MW. Debido a la que la tecnología nuclear sería nueva en el país y es algo costosa, su costo de capital es \$5,068/kW, se recomienda empezar con un pequeño reactor que pueda cubrir cierto porcentaje de la potencia instalada de la energía térmica. El reactor VBER-300 de 325 MW sería una opción viable para cubrir un porcentaje de la potencia instalada de energía térmica. Actualmente hay 959.60MW de generación térmica en Honduras, una pequeña central de 325 MW de generación nuclear podría cubrir un 33% de la generación térmica.

6.2 Características del reactor

El VBER-300 es un reactor de agua a presión ruso de 325 MW, la estructura de contención exterior tiene 16 metros de altura y la sección de trabajo, construida con módulos transportables, pesa 1,300 toneladas.

6.2.1 Características Básicas del Reactor VBER-300

- Disposición modular de la planta del reactor
- Vaso integral Generador de vapor de paso directo con sistema de tubería de titanio
- Bombas de circulación principal a prueba de fugas
- Núcleo del reactor con potencia nominal reducida
- Combinación óptima de sistemas de seguridad pasivos y activos

Tabla 1: Características básicas del reactor VBER-300

Operación de Condensado de la Unidad de Potencia	
Potencia eléctrica máxima	325 MW
Operación de Calefacción de la Central Nuclear	
Potencia eléctrica	225 MW
Salida calor	460 Gcal/h

Fuente: "Afrinkantov OKB" (2011)

6.2.2 Características Técnicas del Reactor

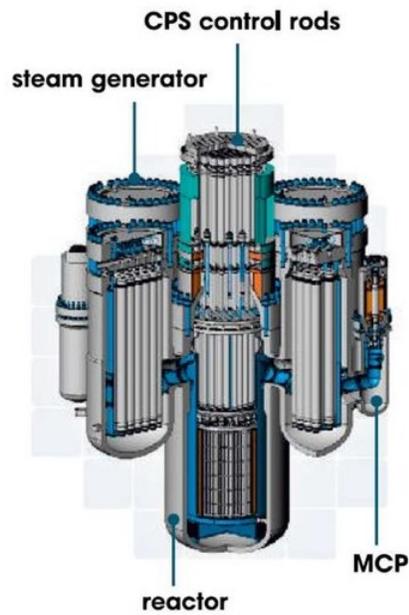


Ilustración 5: Características Técnicas de un Reactor VBER-300

Fuente: Fuente: "Afrinkantov OKB" (2011)

Tabla 2: Características Técnicas de un Reactor VBER-300

Características Técnicas de un Reactor VBER-300	
Poder Térmico	917 MW
Tipo de Combustible	VVER
Periodo de recargar combustible	1.5-2 años
Masa de la unidad del reactor	1332 t
Altura total	14.5 m

Diámetro circunscrito	11.3 m
Periodo de servicio	60 años

Fuente: "Afrinkantov OKB" (2011)

6.2.3 Contención

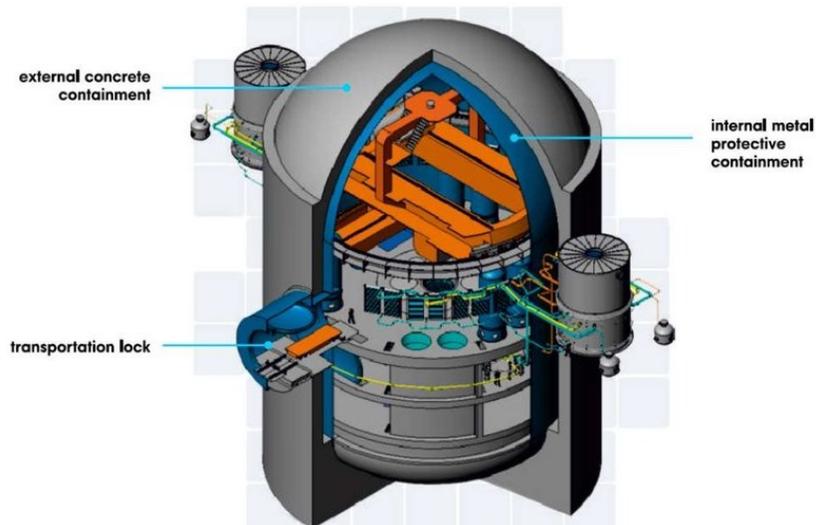


Ilustración 6: Contención del reactor

Fuente: "Afrinkantov OKB" (2011)

Table 3: Protección Contra Impactos Externos y Causados por el Hombre del Reactor

Protección Contra Impactos Externos Naturales y Causados por el Hombre	
Diámetro externo	40m
Espesor de pared	1.5m
Material	Paredes de concreto coladas en sitio, concreto reforzado B40, W12-16

Fuente: "Afrinkantov OKBM" (2011)

6.3 Costo de la Energía Nuclear

Utilizando la ecuación del LCOE podemos ver que la viabilidad económica de una central nuclear.

6.3.1 Costo de Inversión

Table 4: Costo de Inversión para la central nuclear

Costo de Inversión	
Potencia del Reactor	325 MW
Costo de Capital	5,078 \$/kW
Total	\$1,650,350,000.00

Fuente: Elaboración Propia

El reactor VBER-300 cuenta con una potencia de 325 MW, el costo de capital de una central nuclear es de 5,087 \$/kW, el costo de la inversión para este tipo de central sería de \$1,650,350,000.00

6.3.2 Costo de Operación y Mantenimiento

El costo fijo de O&M de una central nuclear es de 103.31 kW/año, tomando en cuenta la vida útil de 60 años de una central nuclear esto nos deja con un valor de \$2,014,545,000.00. Para el cálculo del TIR y VAN se tomó en cuenta la inflación anual.

6.3.3 Precio del Combustible

Un reactor nuclear de 325 MW necesita 8.775 toneladas de uranio por año, lo que equivale a 19,345.54 lb de uranio crudo por año. El costo de la libra de uranio para junio del 2019 es de \$24.30. Tomando en cuenta la vida útil de la central nuclear por 60 años y que se necesita recargar combustible cada dos años, el costo del combustible a \$ \$14,102,899.02.

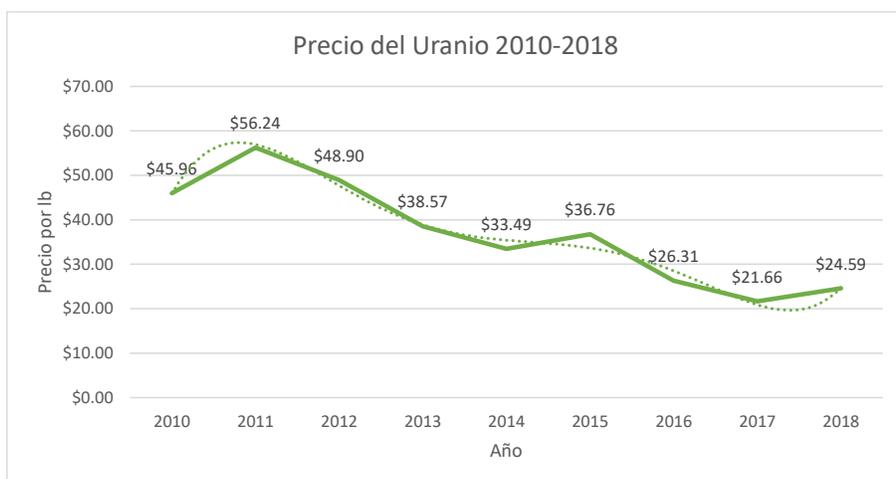


Ilustración 7: Precio del Uranio 2010-2018

Fuente: Elaboración propia con datos de ("Uranium - Monthly Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News - IndexMundi," n.d.)

El precio del uranio ha demostrado ser bien bastante fluctuante en la última década, para el cálculo del TIR y VAN se utilizó el porcentaje de inflación anual.

6.3.4 Energía Generada

Para calcular la energía generada de la planta nuclear se tiene que tener en consideración su factor de planta

Se multiplica la potencia de la planta por las horas de trabajo de un año y se multiplica también por los años de vida útil de central. Se multiplica ese dato por los 60 años de vida útil de la planta.

Se tomo en cuenta que el BID (Banco Interamericano de Desarrollo) da a este tipo de proyectos un 10% de intereses (BID, n.d.). Actualmente la tasa de inflación que tiene Honduras es de un 2.5% (Macro, Sube el IPC en mayo en Honduras, 2019).

Tabla 5: Premisas Básicas del proyecto

Premisas Básicas	
Potencia instalada MW	325
Inversión Inicial Total	\$ 1,650,350,000.00
Monto Financiado	70%
Equity	30%
Tasas de Interés	11%
Inflación	2.5%
Precio Marginal de la Energía \$/kWh	0.1
Precio Marginal de la Potencia \$/kW año	293.8
Factor de Planta (Supuesto)	90.4%
Factor de Disponibilidad	91.3%
Servicios Propios	5%
Costos de O&M kW/añal	103.31

Costo de Combustible lb	24.3
ISR	25%

Fuente: Elaboración Propia

Table 6: Calculo de LCOE de la Generadora Nuclear de 325 MW

Costo de Inversión	
\$1,650,350,000.00	
Precio de combustible por año	Por toda la vida útil de la planta
\$470,096.63	\$14,102,899.02
Operación y Mantenimiento por año	Por toda la vida útil de la planta
\$33,575,750.00	\$2,014,545,000.00
Energía Producida por año	Por toda la vida útil de la planta
2326613952.00 kWh	1.54421E+11 kWh
LCOE	\$0.023 / kWh

Fuente: Elaboración Propia

Resolviendo la formula del LCOE con los datos anteriores el costo de la energía nuclear queda en \$0.023/kWh.

6.3.5 TIR y VAN

En la tabla 8 se puede observar el TIR y VAN del proyecto para los años 10,20,30 y 60 que sería la vida útil de la planta de generación de energía nuclear. El tiempo de retorno de inversión estaría para el año nueve. Al analizar el TIR, VAN y el PayBack en la tabla 8 de acuerdo a los años del proyecto de 325 MW, se puede ver que el proyecto es factible a lo largo de la vida útil de la planta.

Table 7: TIR y VAN del Proyecto

Accionista	TIR	VAN	Pay Back
10 años	6%	(\$235,550,612.47)	8.46
20 años	15%	\$327,395,934.43	
30 años	16%	\$566,225,029.01	

60 años		17%	\$7,416,936,401.99

Fuente: Elaboración Propia

6.4 Localización de la Planta Nuclear

Tomando en cuenta todos los requerimientos geográficos de una planta nuclear, la localización más recomendada sería en el departamento de Olancho.



Ilustración 8: Localización de la Planta Nuclear

Fuente: Elaboración Propia

El departamento de Olancho recibe un bajo riesgo de sismos comparado con otros departamentos en el país. También cuenta con dos ríos que son el Guayape y Patuca que tienen el caudal lo suficientemente grande para poder alimentar el circuito de refrigeración del reactor nuclear.

6.5 Marco Ambiental

6.5.1 Impacto Ambiental

Todas las opciones para generación afectan al medio ambiente. La generación eléctrica a partir de la fisión nuclear no genera directamente emisiones de CO₂ y no tiene un uso intensivo de suelos como las alternativas renovables. El principal problema de este tipo de energía son los desechos radiactivos de nivel intermedio y larga duración.

6.5.2 Gestión de los residuos radiactivos

Algunos residuos de baja actividad se eliminan muy diluidos esparciéndolos a la atmósfera o a las aguas en concentraciones tan pequeñas que no son dañinas y permitidas por la ley. Los índices de radiación que dan estos son menores a los que suelen dar muchas sustancias naturales o algunos objetivos de uso cotidiano como la televisión.

Los residuos de media o baja actividad se introducen en contenedores especiales que se almacenan durante un tiempo en superficie hasta que se llevan a vertederos de seguridad. Los almacenes definitivos para estos residuos son generalmente subterráneos.

Los residuos de alta actividad que generalmente es el combustible gastado que queda en las centrales se puede reducir si se vuelve a utilizar en plantas especiales.

Los residuos que quedan se pueden vitrificar e introducir en contenedores especiales que son capaces de resistir grandes colisiones, terremotos, agentes corrosivos y fuego. Estos contenedores se almacenarían en vertederos definitivos que deben estar en lugares estables geológicamente y bien refrigerados porque los isótopos radioactivos emiten calor.

6.5.3 Desmantelamiento de una central nuclear

Las centrales nucleares envejecen en 30 o 40 años y luego deben ser desmontadas, el desmantelamiento de las centrales nucleares produce en grandes cantidades residuos radiactivos. Los materiales de la zona del reactor son RAA en gran parte y otros RMBA.

Cuando una central va a ser cerrada hay varias opciones:

4. Dejarla custodiada por la compañía que la explotó durante un largo periodo hasta de 100 años, esperando que disminuya la radiación y sea seguro su desmantelamiento. (Echarri, 1998)
5. Cubrirla totalmente de hormigón como se hizo en el caso de Chernóbil, esta práctica es poco segura por que la estructura tendría que permanecer sin fisuras durante cientos de años y es algo imposible de garantizar. (Echarri, 1998)
6. Desmantelar la planta, llevando los materiales contaminado a almacenes de residuos radioactivos. Para hacer esta operación es fundamental que los trabajadores usen equipo de protección adecuado y se usen robots especialmente diseñados para la tarea. (Echarri, 1998)

6.5.4 Documentación para Construcción

Actualmente Honduras tiene establecidos leyes para el tratamiento de desechos radioactivos de una central nuclear y los permisos ambientales que se necesitan para una generadora nuclear.

Se necesitan los siguientes documentos requeridos por la DECA para la construcción de una central de energía nuclear:

1. "Constancia de la Unidad Municipal de Ambiente (UMA) de la Municipalidad respectiva, de encontrarse el proyecto en la zona de desarrollo correspondiente.
2. Punto de Acta Municipal de Socialización del proyecto en Cabildo Abierto

con las comunidades del área de influencia del proyecto.

3. Polígono del proyecto con rumbos y distancias ó coordenadas geográficas en UTM o WGS84 de los vértices.
4. Planos de distribución del proyecto
5. Diseño de sitio (sólo aplica para proyectos de construcción).
6. Constancia del proveedor de los servicios de agua potable, alcantarillado, energía, recolección de residuos en caso de que aplique.
7. Diseño de sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales en caso de aplicar o requerir de tratamiento.
8. Constancia emitida por ICF que haga costar que el aprovechamiento forestal cuenta con plan de manejo o plan de salvamento" (Mi Ambiente, 2018).

6.5.5 Estudios Ambientales

Para la construcción de una central nuclear se quiere los siguientes estudios ambientales:

- a. "Descripción del medio ambiente afectado, en relación con el ambiente fisicoquímico (aire, ruido, clima, agua, suelo, geología, etc.)
- b. Rangos y límites permisibles de contaminación.
- c. En relación con el ambiente biológico (flora, fauna, ecosistemas biodiversidad, cuerpos de agua superficiales)
- d. Generación y disposición final de aguas residuales de naturaleza doméstica e industrial.
- e. Resultados de análisis generados por un laboratorio externo al proyecto de muestras de efluentes de descarga de aguas residuales e industriales.
- f. Impactos en el ecosistema acuático, contaminación del suelo, acuíferos.
- g. Generación de ruido que afecta a trabajadores y medio circundante.
- h. Generación y disposición de desechos sólidos de tipo doméstico e industrial.
- i. Impactos en el turismo y recurso escénico.
- j. Impactos visuales.
- k. Emisiones de partículas y gases, dispersión en el aire y efectos en el medio ambiente." (Mi Ambiente, 2018).

6.5.6 Reducción de Emisiones de CO₂

Honduras cuenta con tres tipos de generación térmica: carbón, Diesel y gas natural. En la tabla 8 se puede observar la cantidad de CO₂ que estas generadoras emiten.

Table 8 Cantidad de kg de CO₂ por kWh

Generadora	MW	CO ₂ kg /GWh
Diesel	808.6	1,912.5
Gas	66.5	116.508
Carbón	99.8	998.391

Fuente: Elaboración propia

La generadora de energía nuclear podría reemplazar la generadora de gas, carbón y 158 MW de las generadoras térmicas. En la Tabla Numero 9 se puede observar el ahorro de emisiones de CO₂ que la central nuclear crearía teniendo en cuenta su factor de planta del 90.4%.

Table 9 Ahorro de Emisiones de CO₂ kg/kWh

Generadora	MW	CO ₂ kg/GWh
Nuclear	293.4	0
Diesel	122	298.554
Gas	66.5	116.508
Carbón	99.8	998.391
Ahorro de CO ₂ kg/GWh		1,286.945

Fuente: Elaboración Propia

Al instalar una de central nuclear de energía en Honduras el ahorro anual de CO₂ sería de 1,286.945 kg/GWh.

6.6 Percepción Social de la Energía Nuclear en Honduras

Se entrevistaron 118 personas para conocer la percepción de las centrales nucleares en Honduras. Se comenzó la encuesta preguntando a los encuestados si conocían que era una central de energía nuclear. De las 118 personas encuestadas 110 contestaron que sabían lo que es una central de energía nuclear. De los 110 encuestados 52.9% contestaron que no apoyarían la construcción de una central nuclear en Honduras.

La siguiente pregunta solicitaba a los encuestados que indicaran dos aspectos negativos y positivos de la energía nuclear. En los aspectos positivos salió a relucir que muchos de ellos estaban de acuerdo a que la energía nuclear es considerada "energía limpia" debido a que no emite gases de efecto invernadero. También se le llamó eficiente, energía constante, y que utiliza poco combustible a comparación de las térmicas. En los aspectos negativos muchas personas comentaron acerca de los peligros de la radiación, los desechos radiactivos y el alto costo de la generación de energía nuclear.

Cabe recalcar que, aunque la mayoría de los encuestados no estarían de acuerdo con la construcción de una central nuclear en Honduras el 54.9% preferirían que se inaugurará una central nuclear nueva a una central térmica. Dentro de la encuesta también se pudo ver que la mayoría de los encuestados sabían que la energía nuclear es una alternativa viable para el crecimiento de la demanda energética y que es una fuente de energía que no produce gases de efecto invernadero.

VII. CONCLUSIONES Y ANÁLISIS

7.1 Conclusión General

Después de realizar el estudio de prefactibilidad se puede confirmar que una planta nuclear de 325 MW es factible. Es técnica y económicamente factible, se obtuvo un VAN positivo y un payback de ocho años y medio. Se cuenta con una localización optima en el departamento de Olancho para poder instalar una central de energía nuclear. El mayor obstáculo que esta generadora podría afrontar sería la socialización del proyecto debido a que los hondureños tiene una mala percepción de las centrales de energía nuclear.

7.2 Conclusiones Especificas

- Después de comparar los reactores más utilizados para las centrales nucleares, el reactor más factible sería un PWR de 325 MW. Este tipo de reactor es más estable ya que reduce su potencia ante incrementos de temperatura y se necesita menos material fisible para alcanzar la condición crítica de los neutrones.
- Se realizó el cálculo para el LCOE de la generadora tomando en cuenta sus costos de operación y combustible en 60 años y su valor es de \$ 0.023/kWh.
- Los permisos ambientales pueden ser encontrados en la página de la DECA (Dirección General y Control Ambiental) y los desechos radiactivos son manejados según su clasificación y el reglamento para la gestión de desechos radiactivos.
- Muchos hondureños tienen una mala percepción de la energía nuclear. La mayoría no apoyaría la instalación de una central de energía nuclear en Honduras debido a los riesgos de los desechos radiactivos y el riesgo de un posible accidente nuclear. La encuesta también muestra que, aunque no apoyarían la instalación de una central de energía nuclear, esta es más preferible a la instalación de otra central de energía térmica debido a que esta no emite gases de efecto invernadero para generar energía.
- La central nuclear genera un alto ahorro de emisiones de CO₂, 1,286.945 kg/GW

- Con la cantidad de energía que produce y su factor de planta de 90.4% podría reemplazar un 33% de las generadoras térmicas en Honduras.
- El departamento de Olancho fue el lugar óptimo para la instalación de una central nuclear debido a que corre bajo riesgos sísmicos, tiene ríos con el caudal suficiente para la planta y no tiene riesgos de accidentes volcánicos.

Es importante saber que muchas limitaciones del proyecto fue la falta de información acerca de la energía nuclear y este tipo de generadoras en Honduras. Tendría que evaluarse el impacto ambiental y social que este tipo de generadoras podría tener. Se necesita conocer las leyes de seguridad y verificar que autoridad será la que se haga a cargo de los desechos radiactivos.

VIII. RECOMENDACIONES

8.1 Recomendación General

Los costos de capital y combustible pueden variar y se tienen que actualizar ya que estos son parámetros que son fluctuantes en las centrales de energía nuclear.

8.2 Recomendaciones Especificas

Se le recomienda al inversionista analizar el estado jurídico actual de Honduras antes de hacer la inversión.

Se recomienda conectar la generadora con el SIEPAC, y evaluar el flujo de caja, TIR, VAN y retorno de inversión según el costo de venta de energía que se le daría al SIEPAC.

Se recomienda hacer una campaña de información acerca de energía nuclear y sus beneficios a las comunidades cercanas del proyecto ya que este tipo de generadoras se afrontaría a una difícil socialización exitosa.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Association, W. N. (Abril de 2019). *Economics of Nuclear Power*. Obtenido de World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- BID. (s.f.). *Préstamos al Sector Privado*. Obtenido de BID: <https://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/financiamiento-del-bid/prestamos-al-sector-privado-,6061.html>
- Daniel Charlín, H. M. (25 de Mayo de 2009). *Modelo de Negocios de una Planta Nuclear*. Obtenido de Metodología de evaluación del proyecto: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/nuclear/metodologia%20evaluacion.html>
- Echarri, L. (1998). Residuos radiactivos. En L. Echarri, *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*.
- Heraldo, E. (2014). *Consumo de energía en Honduras sube 2.4% en primer trimestre*. Obtenido de El Heraldo: <https://www.elheraldo.hn/tag/711576-214/consumo-de-energ%C3%ADa-en-honduras-sube-24-en-primer-trimestre>
- Kiziryan, M. (2018 de abril de 2018). *Flujo de Caja*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/flujo-de-caja.html>
- Macro, D. (2017). *Honduras- Emisiones de CO2*. Obtenido de datosmacro.com: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/honduras>
- Macro, D. (Mayo de 2019). *Sube el IPC en mayo en Honduras*. Obtenido de Datos Macro : <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/honduras>

Mi Ambiente. (2018). *Generación de energía a partir de la fusión de núcleos atómicos y subestación del generador*. DECA.

Montes, I. C. (3 de Mayo de 2019). Entrevista a el Ingeniero Nuclear Carlos Montes. (N. Cano, Entrevistador)

Morales, V. V. (2018). *Valor Actual Neto*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>

Nuclear, F. (s.f.). *¿Cómo se clasifican los residuos radiactivos?* Obtenido de Foro Nuclear : <https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/121510-como-se-clasifican-los-residuos-radiactivos>

Partanen, R. (19 de Septiembre de 2018). *Cost of Nuclear for Dummies, and Future Generations*. Obtenido de Energy Reporters: <https://www.energy-reporters.com/opinion/cost-of-nuclear-for-dummies-and-future-generations/>

Prensa, L. (17 de Diciembre de 2018). *Matriz energética de Honduras ya es mas de 64% renovable*. Obtenido de La Prensa: <https://www.laprensa.hn/economia/1243081-410/generacion-energia-renovable-honduras-enee-matria-energetica>

Prim, L. E. (s.f.). *Energía Nuclear*. Obtenido de TECNUN ES: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/00General/Glosario.html>

Reyes, T. (03 de Enero de 2019). *Cómo calcular la Tasa Interna de Retorno (TIR) y qué es la regla de la TIR*. Obtenido de La Clase Ejecutiva: <https://claseejecutiva.emol.com/articulos/tomas-reyes/como-calcular-la-tasa-interna-de-retorno-tir-y-que-es-la-regla-de-la-tir/>

Rodriguez, L. (23 de Febrero de 2019). *Honduras: ¿En que mes se demanda más energía eléctrica?*

Obtenido de El Heraldo: <https://www.elheraldo.hn/economia/1261814-466/honduras-en-qu%C3%A9-mes-se-demanda-m%C3%A1s-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica>

Styles III, J. H. (19 de Mayo de 2017). *Nuclear Power Plant Water Usage and Consumption*. Obtenido

de Stanfor University: <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/styles2/>

UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1. (s.f.). *Ingeniería Química*. Obtenido

de Tipos de Reactores Nucleares: <https://ingenieria-quimica9.webnode.es/products/tipos-de-reactores-nucleares/>

X. ANEXOS

10.1 Residuos Radiactivos de una Planta Nuclear

Tabla 10: Porcentaje de Residuos Radiactivos en una Planta Nuclear

	Volumen	Contenido Radioactivo
Residuos de alto nivel	3%	95%
Residuos de nivel intermedio	7%	4%
Residuos de bajo nivel	90%	1%

Fuente: Asociación Nuclear Mundial

10.2 Zonas con Alto Riesgo de Sismos en Honduras

Clasificación de los sismos

Los sismos se pueden caracterizar como un proceso de ruptura y deformación elástica de material de la litosfera y bajo esas condiciones todos los sismos son iguales; sin embargo, se ha visto que dependiendo del tipo de falla causal, así como del medio de propagación, los sismos pueden tener consecuencias diferentes en la superficie.

Es por eso que se pueden clasificar según su zona de generación y su profundidad:



- 1 Sismos de subducción someros
Fallas inversas, no exceden los 40 km.
- 2 Sismos de subducción profunda
Fallas normales, mayores a los 40 km.
- 3 Sismos intraplacas de profundidad intermedia
Fallas normales, en la placa subducida, no ocasionadas por fricción entre las placas sino por fractura de la placa que ha penetrado, mayores a los 40 km.
- 4 Sismos de zonas de acreción
No exceden los 20 km.
- 5 Sismos de fallas de transcendencia
No exceden los 30 km.
- 6 Sismos corticales
Sismos que ocurren en el interior de una placa, su profundidad no excede el grosor de la placa.

INFOGRAFÍA: JORGE GALLO/LA PRENSA

FUENTE: SECRETARÍA DE SALUD

Ilustración 9: Zonas con Riesgo de Sismo en Honduras

Fuente: ("Estas zonas de Honduras son vulnerables a terremotos - Diario La Prensa," n.d.)

10.3 Ríos de Honduras

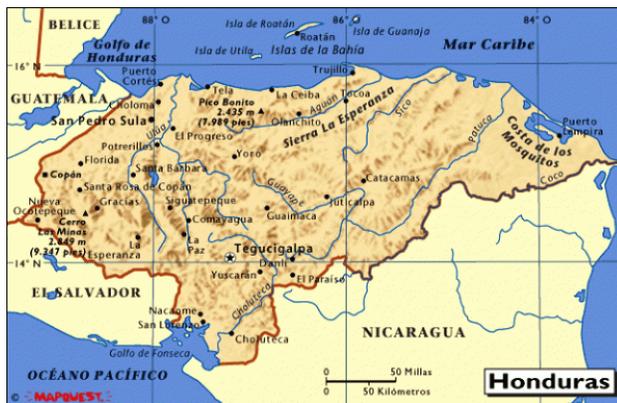


Ilustración 10: Ríos de Honduras

Fuente: ("HONDU TAREAS, LAS TAREAS DE HONDURAS: Principales Ríos de Honduras (Mapa y Ríos)," n.d.)

10.4 Distribución de Volcanes en América Central



Ilustración 11: Volcanes en América Central

Fuente: ("Mapa de volcanes de América Central," 2018)

10.5 Encuesta "Percepción de la energía nuclear en Honduras"

¿Sabe qué es una central de energía nuclear? (En el caso de que el entrevistado responda que no termina la entrevista)

¿Apoyaría que en Honduras se construyera una central nuclear?

Por favor indique dos aspectos positivos de la energía nuclear.

Por favor indique dos aspectos negativos de la energía nuclear.

¿Preferiría que se inauguraré una central térmica o una central nuclear en Honduras?

¿Sabía que la energía nuclear es una de las alternativas más viables para la creciente demanda energética?

¿Sabía que las centrales nucleares no producen gases de efecto invernadero?

Commented [HFVF1]: Ponga la encuesta como un anexo.

10.6 Respuesta Pregunta número uno de la Encuesta

1. ¿Sabe qué es una central de energía nuclear?

118 respuestas

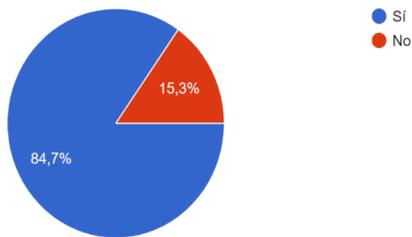


Ilustración 12: Resultado a pregunta número uno de la encuesta

Fuente: Elaboración Propia

10.7 Pregunta Número dos de la Encuesta

¿Apoyaría la construcción de una central nuclear en Honduras?

104 respuestas

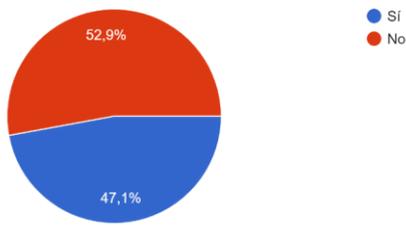


Ilustración 13: Resultado pregunta número dos de la encuesta

Fuente: Elaboración Propia

10.8 Pregunta Número cinco de la Encuesta

5 ¿Preferiría que se inaugurará una central térmica o una central nuclear en Honduras?

102 respuestas

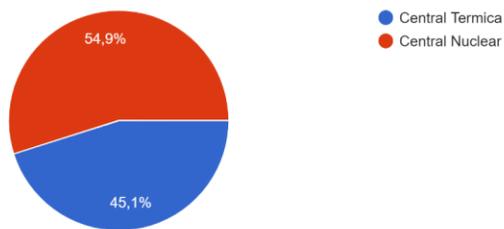


Ilustración 14: Respuesta pregunta numero cinco de la encuesta

Fuente: Elaboración Propia

10.9 Pregunta Número seis de la Encuesta

6. ¿Sabía que la energía nuclear es una de las alternativas mas viables para la creciente demanda energética?

101 respuestas

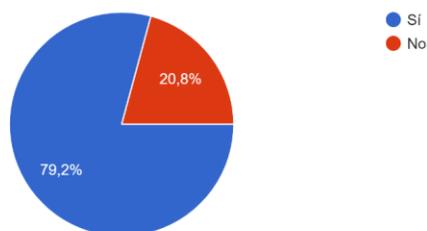


Ilustración 15: Resultado Pregunta Número Seis de la Encuesta

Fuente: Elaboración Propia

10.10 Pregunta Número siete de la Encuesta

7. ¿Sabía que las centrales nucleares no producen gases de efecto invernadero?

101 respuestas

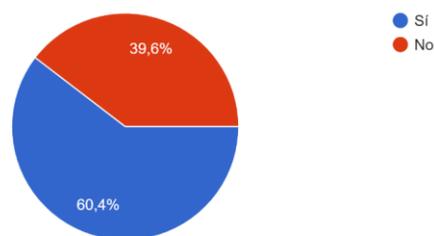


Ilustración 16: Resultado de la pregunta número siete

10.11 Datasheet del Reactor

JSC "AFRIKANTOV OKBM"



**SERVING THE NUCLEAR MACHINE
BUILDING INDUSTRY SINCE 1945**

JSC "Afrikantov OKBM"
15 Burnakovsky Proyezd, Nizhny Novgorod, 603074
Tel: (831) 275-40-76, 275-26-40
Fax: (831) 241-87-72
e-mail: okbm@okbm.nnov.ru
www.okbm.nnov.ru

VBER-300
VBER-300

Joint Stock Company "Afrikantov OKB Mechanical Engineering"

VBER-300

REGIONAL POWER ENGINEERING
NUCLEAR POWER PLANTS
WITH VBER REACTOR PLANTS



ADVANTAGES OF NPPS WITH VBER-420 REACTORS

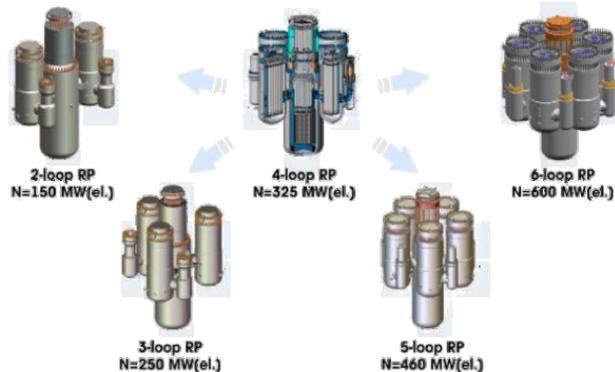
- high reliability and longevity of modular reactor plants (over 6500 reactor-years experience in prototype operation).
- maximum possible compactness of the reactor plant and, respectively, minimum reactor unit sizes as compared to traditional reactor plants of existing NPPs.
- lowest technical and investment risks of design implementation.
- possibility of siting near power utilities (i.e. double-purpose application considerably improving economic indices of nuclear cogeneration plants with VBER-300 reactors).

BASIC CHARACTERISTICS OF NUCLEAR POWER PLANTS WITH VBER-300 REACTOR PLANTS

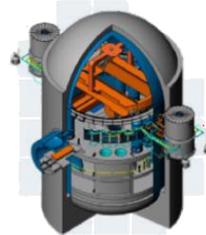
Modular arrangement of the reactor plant.
Integral vessel.
Straight-through steam generator with titanium pipe system.
Leak-tight main circulation pumps.
Reactor core with decreased power rating.
Optimal combination of passive and active safety systems.

Condensate operation of NPP power unit	
maximum electric power, MW	325
Heating operation of NPP power unit	
electric power, MW	225
heat output, Gcal/h	460

VBER REACTOR TECHNOLOGY ALLOWS DESIGNING POWER UNITS OF A WIDE POWER RANGE



VBER-300 CONTAINMENT



PURPOSE – PROTECTION FROM EXTERNAL NATURAL AND MAN-CAUSED IMPACTS

External diameter, m	40
Wall thickness, m	1,5
Material	extra density cast-in-situ reinforced concrete B40, W12-16

EXTERNAL IMPACTS

Crush of an airplane	
mass, t	20
speed, m/s	200
affected area, m ²	7...14
Air shock wave with background pressure, kPa	
duration, s	1
direction	horizontal

BASIC TECHNICAL CHARACTERISTICS OF VBER-300 REACTOR PLANT

Thermal power, MW	917
Type of fuel	VVER
Inter-refueling periods, year	1,5-2
Reactor unit mass, t	1332
Overall height, m	14,5
Circumscribed diameter, m	11,3
Service period, year	60

