



Alternativa Tecnológica para la Generación de Energía Eléctrica en la Industria Petroquímica Venezolano

Technological Alternative for the Electric Power Generation
in the Venezuelan Petrochemical Industria

Ricardo Ronchetti

ricardoronchetti@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0961-2989>

Petroquímica de Venezuela S.A (PEQUIVEN)

Adolfina Amaya

adolamaya@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6653-2032>

Resumen

El objetivo general de esta investigación fue proponer una alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, basándose teóricamente en autores como Balagurusamy (2017) y Birolini (2017). El tipo de investigación fue descriptiva, proyectiva con diseño bibliográfico documental, retrospectivo. La población estuvo conformada por 62 documentos, trabajos especiales de grado, publicaciones oficiales y uso de software profesional. De este modo se diagnosticó la situación actual como necesitada de una alternativa para conseguir autosuficiencia energética. Se consideraron las tecnologías de biomasa, eólica, agua y solar como posibles soluciones. Se determinó a la tecnología fotovoltaica como la tecnología creadora de mayor valor en el tiempo, implantable en todas las instalaciones que conforman el Industria petroquímico venezolano. La propuesta de alternativa tecnológica fue diseñada con el software PVsyst, utilizando un área disponible en estacionamientos junto con los techos de los edificios de 11,761.24 m², los cuales fueron capaces de generar 1764 kW con una inversión estimada de MMUSD 6,574. La implantación de esta propuesta permitirá al Industria petroquímico depender menos del Sistema Eléctrico Nacional, beneficiando a una gran parte de la población del municipio Miranda del estado Zulia, al tener disponible más energía eléctrica.

Palabras clave: alternativa tecnológica, energía, energía renovable, generación de energía, tecnología fotovoltaica.

Abstract

The general objective of this research was to propose a technological alternative for the generation of electric energy in the Venezuelan petrochemical Industria, theoretically based in authors such as: Balagurusamy (2017), Birolini (2017). The type of research was descriptive and retrospective, projective with a documentary documentary and bibliographic design. The population consisted of 62 documents, special grade jobs, official publications and use of professional software. In this way, the current situation is diagnosed as needing an alternative to obtain energy self-sufficiency. The technologies of biomass, energy, water and solar energy are



considered as possible solutions. The photovoltaic technology was determined as the technology creator of greater value over time, implantable in all the facilities conform the Venezuelan petrochemical Industria. The proposal of a technological alternative was designed with the software PVsyst, using an area available in parking lots along with the roofs of the buildings of 11,761.24 m² which are capable of generating 1764 kW with an estimated investment of 6.573.946 dollars. The development of this proposal will allow the petrochemical Industria depends less on the National Electric System, benefiting a large part of the population of the municipality.

Keywords: technological alternatives, energy, renewable energy, power generation, photovoltaic energy

Introducción

En la actualidad la generación y el consumo de energía eléctrica son una necesidad debido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad moderna. Esta creciente demanda de energía eléctrica necesaria para el mundo, es abastecida de la obtenida en gran medida a partir de combustibles fósiles como carbón, petróleo o gas natural. Venezuela está obligada a reducir sus emisiones por su adhesión al Protocolo de Kyoto el 7 de diciembre de 2004, por tanto es urgente impulsar el uso de tecnologías alternas para producir energía eléctrica, amigables con el medio ambiente.

Al respecto, Bautista (2012) señala que existe muy poca diversificación de tecnologías de generación eléctrica, casi un 70% es proveniente de las hidroeléctricas. Para el año 2009, los registros indican 85.692,39 GWh de un total de 124.271,75 GWh fueron aportados por fuentes de energía proveniente de las centrales hidroeléctricas. El resto de la energía eléctrica fue generada por plantas termoeléctricas, utilizando para ello gas o productos derivados del petróleo contribuyentes al contaminar con dióxido de carbono (CO₂) el ambiente.

El Complejo Petroquímico Ana María Campos (CPAMC), ubicado en el municipio Miranda del estado Zulia, posee según diseño una capacidad de generación eléctrica nominal total de 121 MW. El sistema fue diseñado para operar con un generador fuera de servicio y en caso extremo de pérdida total de generación, la interconexión con el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es capaz de suplir la totalidad del consumo eléctrico del Complejo.

Sin embargo, motivado a los múltiples problemas acaecidos en los últimos años en la economía venezolana, como falta de suministro de repuestos por el bloqueo económico, retardo en la ejecución de los planes de mantenimiento preventivo y actualización tecnológica, pérdida de personal altamente capacitado en los procesos, entre otros, el CPAMC ha perdido capacidad de generación en 80% llevándola a 40 MW.

Por lo antes expuesto, resulta pertinente evaluar la factibilidad técnica y económica de seleccionar una alternativa tecnológica que permita generar energía eléctrica sustentable para reducir la dependencia del SEN en los Complejos Petroquímicos de la Corporación Petroquímica Venezolana (Pequiven), aprovechando las ventajas tanto geofísicas como demográficas donde se encuentran ubicados, la irradiación del sol, el viento, las mareas, hasta la biomasa implícita en la actividad humana, todos estos recursos tienen un gran potencial para hacer frente al déficit energético mediante la generación de energía eléctrica sustentable.



Objetivo general

Proponer una alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano.

Objetivos Específicos

Diagnosticar la situación actual de la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano.

Identificar alternativas tecnológicas disponibles para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano.

Seleccionar la alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano.

Metodología

Esta investigación se catalogó como descriptiva, proyecto factible en concordancia con Arias (2016), debido a que su finalidad fue proponer una alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano. Con base en el método, la investigación fue de tipo descriptiva proyectiva, con un diseño documental bibliográfico según lo define Tamayo y Tamayo (2017), la información se obtuvo mediante fuentes documentales en el área de tecnología aplicada a la generación de energía eléctrica.

En este mismo orden de ideas, para esta investigación se utilizó la búsqueda, selección, recopilación, organización y valoración de información asociada a las tecnologías de generación eléctrica, tanto convencionales como no convencionales, contenida en publicaciones, investigaciones, luego se determinaron las tendencias tecnológicas y su impacto al ambiente para la generación eléctrica del Industria petroquímico.

La población fue no probabilística, porque su selección no obedeció a la probabilidad, sino a causas relacionadas con las características propias de la investigación, específicamente un diseño documental. La misma quedó conformada por 62 documentos provenientes de trabajos de grado, publicaciones oficiales, revistas científicas, así como catálogos de fabricantes de equipos, páginas asociadas a las empresas que fabrican o comercializan alternativas tecnológicas para la generación de energía eléctrica y software profesional. Por otra parte, se considera como intencional (Sabino, 2014), porque se escogieron las unidades de análisis no en forma fortuita sino completamente arbitraria e intencional, ya que se tomó sobre la base del juicio del investigador, según las características que resulten relevantes para el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

Se utilizó la técnica de observación documental de presentación resumida, tal y como lo explica Icart (2013) como una lectura general de los textos que contienen las fuentes de información de interés, extrayendo los datos identificados de utilidad para la investigación. Para el caso específico del diagnóstico de la situación actual de la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, se utilizaron matrices de análisis, según lo expuesto por (2016).



Fundamentación teórica

Mantenimiento

Según García (2013) el concepto de mantenimiento ha venido evolucionando con el tiempo siendo el más acertado “mantenimiento sin desperdicio”, definiéndolo como la diferencia entre la manera de hacer las cosas y como deberían hacerse o conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y máximo rendimiento. A escala mundial este término se conoce como un nivel de referencia asociado a empresas donde han alcanzado la excelencia en sus procesos claves de la cadena de valor.

Para Duffuaa y Raouf (2015) es la combinación de actividades mediante las cuales un equipo o un sistema se mantienen en, o se restablece a, un estado en el que puede realizar las funciones designadas. Al respecto, Torres (2010) explica que para interpretar la forma de actuación del mantenimiento se hace necesario ver y analizar distintas variables de significación, repercutiendo en el desempeño de los sistemas, entre las que se mencionan: confiabilidad (también conocida como fiabilidad), disponibilidad, mantenibilidad, calidad, seguridad, costo y entrega/plazo.

Confiabilidad (MTBF)

Para Muñoz (2009), la confiabilidad de un producto o un sistema es la probabilidad de que este desempeñe satisfactoriamente un periodo dado y bajo ciertas condiciones de operación establecidas. Tal y como lo explica Nava (2009), este concepto, de manera similar a muchas técnicas de calidad y productividad, tuvo su origen durante la segunda guerra mundial, pues en ese momento era una meta fundamental lograr alta confiabilidad en el material bélico a fin de disminuir al máximo la probabilidad de falla en cualquier equipo. La confiabilidad es la probabilidad de que una unidad de producto se desempeñe satisfactoriamente cumpliendo con su función durante un período de tiempo diseñado y bajo condiciones previamente especificadas.

Por otro lado, Balagurusamy (2017) define la confiabilidad como la probabilidad donde una falla puede ocurrir en un intervalo de tiempo dado. Mientras Birolini (2017) la define como una característica de un elemento, expresada por la probabilidad de que el elemento llevará a cabo la función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo establecido, de tal manera de no producir interrupciones operativas durante un intervalo de tiempo fijado. Esto no significa que las partes redundantes no puede fallar, dichas piezas pueden fallar y ser reparadas (sin interrupciones operacionales en material (sistema) de nivel). A menudo se utiliza el valor recíproco de la tasa de fallas o tiempo medio entre fallas, el cual puede medirse en horas, se expresa por la siguiente ecuación:

$$MTBF = (\text{Tiempo total de funcionamiento}) / (\text{Número de fallas}) \quad (1)$$

Mantenibilidad (MTTR)

Para Arques (2009) cuando se produce un fallo en un equipo, se necesita un tiempo para detectar en qué componente se ha producido y para repararlo o sustituirlo por uno nuevo a fin



de dejar el equipo en condiciones de funcionamiento., definiendo la mantenibilidad como la probabilidad de un equipo que ha tenido un fallo sea puesto de nuevo en funcionamiento, mediante la aplicación de ciertas acciones, dentro de un tiempo t , donde se conoce como tiempo de restauración.

De acuerdo con Torres (2010), es la probabilidad que una máquina, equipo o un sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un período de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad. Es la cualidad en cuanto a su facilidad para realizar el mantenimiento, depende del diseño y pueden ser expresados en términos de frecuencia, duración y costo. Por tanto, debe tratar de evitar las fallas, restablecer el sistema lo más rápido posible, dejándolo en condiciones óptimas de operar a los niveles de producción y calidad exigida. Por su parte, Arata (2009) define la mantenibilidad como la facilidad para una intervención de mantenimiento o reparación, medida sobre la base de los tiempos de detención del equipo:

$$MTTR = (\text{Tiempo total de inactividad}) / (\text{Número de fallas}) \quad (2)$$

Disponibilidad (D)

Según Nava (2009) la disponibilidad es la probabilidad de que un equipo esté operando y disponible para su uso durante un periodo de tiempo determinado. Es una función, la cual permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total donde se puede esperar si un equipo está disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. Para Mora (2009) se refiere como la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento, donde sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables. El tiempo total incluye el tiempo de operación, el lapso activo de reparación, el periodo inactivo, el mantenimiento preventivo (en algunos casos), el tiempo administrativo y el de funcionamiento sin producir y tiempo logístico.

Por otro lado, Parra y Crespo (2015) la definen como un indicador técnico para estimar en forma global el porcentaje de tiempo total de un equipo esté en condiciones para cumplir su función requerida cuando se le suministran los medios exteriores necesarios para su operación (combustible, potencia, entre otros). A través del estudio de los factores influyentes sobre la disponibilidad (MTBF y MTTF), es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas para incrementar la disponibilidad de los activos de producción. Unidad de medición: % (relación de tiempos operativos y tiempos fuera de servicio). Expresión de cálculo:

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) * 100 \quad (3)$$

Capacidad

En término general la capacidad nominal de los equipos, especialmente para generadores, transformadores, reguladores entre otros dispositivos en pie, tienen su base en la tasa de deterioro. Según Alfonso (2010), este término está referido a la carga que dará lugar a un deterioro gradual del aislamiento interno del dispositivo debido al calor de las pérdidas eléctricas, hasta un punto definido (50% de su resistencia mecánica), durante un tiempo



determinado. Enríquez (2015) la define como una medida relacionada del rendimiento real de una máquina o proceso con su rendimiento especificado.

Para especificar estas medidas, se definen los índices de capacidad como indicadores del control estadístico tanto en máquinas como en procesos y que prueban la aptitud de éstos para cumplir las especificaciones o informan de la evolución de las mejoras introducidas como consecuencia de las acciones correctoras aplicadas. Por su parte, Lleó y Lleó (2014) la definen como el cociente entre la carga y la diferencia de potencia. En un condensador, se considera la carga del mismo dividido por la diferencia de potencial entre las placas. Mientras en un conductor es el cociente entre su carga y su potencial.

Capacidad Instalada y Real

La capacidad instalada o nominal de un sistema es definida por Alfonso (2010) como la suma de las potencias nominales de las unidades de generación del Sistema Eléctrico. Este valor es considerado para el análisis de la evolución de la generación. Ramírez (2009) la define como la suma de las potencias nominales de los equipos (transformadores, generadores), instalados a líneas que suministran la potencia eléctrica a las cargas o servicios conectados.

Por su parte, Córdoba (2011) la define como el nivel máximo de producción o prestación de servicios donde los trabajadores con la maquinaria, equipos e infraestructura disponible pueden generar permanentemente. Mientras la capacidad real para Alfonso (2010) es un indicador basado en las pruebas de potencia efectiva realizado a ciertos estándares donde se le exige la máquina su máxima potencia. Este valor de potencia es considerado como insumo en los despachos diarios de energía como el valor máximo de la máquina.

De igual manera, Córdoba (2011) lo define como el porcentaje de la capacidad instalada que en promedio se está utilizando, teniendo en cuenta las contingencias de producción y ventas, durante un tiempo determinado. Mientras que para Sapag (2011), es el promedio anual de actividad efectiva de acuerdo con la variable interna (capacidad del sistema) y externa (demanda).

Alternativa Tecnológica

Según Méndez (2006) las alternativas tecnológicas son todas aquellas que constituyen posibilidades distintas a las propias del modelo establecido. Clasificándolas en las siguientes modalidades:

- a. Tecnologías regionales, que procuran la descentralización y autosuficiencia dentro del marco geográfico propio de las unidades sociales.
- b. Tecnologías ecológicas con bajo impacto sobre el medio ambiente.
- c. Tecnologías conservadoras de recursos.
- d. Tecnologías de pequeña escala.
- e. Tecnologías de trabajo intensivo, que minimizan la inversión y potencian el uso de la mano de obra especializada.

Para Soriano (2008) significan alguna actividad tal como investigación, elección, negociación, adquisición, adaptación, innovación, teniendo en cuenta que la adquisición de nuevas tecnologías requiere un sistema receptivo a la innovación con incentivos y mecanismos para lograr traducir los conocimientos en acción. Según Naveda (2016) es la actividad organizacional mediante la cual se



define e implanta la tecnología necesaria para lograr los objetivos y metas del negocio en términos de calidad, efectividad, adición de valor y competitividad.

Resultados de la investigación

Situación Actual

Los resultados del análisis de los datos recolectados, referidos al primer objetivo sobre diagnosticar la situación de la generación eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, arrojaron la importancia de los servicios industriales del complejo, convirtiéndolo en uno de los procesos medulares de mayor criticidad, punto clave y necesario para el buen desarrollo y continuidad de las operaciones de la industria petroquímica venezolana

De acuerdo con la empresa consultora Venezolana de Proyectos Integrados (Vepica, 2013), en su informe elaborado para Pequiven, la capacidad de generación eléctrica nominal del Complejo Petroquímico Ana María Campos, se realiza a través de dos (02) turbinas a vapor de 30 MW, dos (02) turbinas a gas de 17 MW y una turbina a gas de 27 MW, sumando una capacidad de generación total de 121 MW, la cual se vio reducida a 91 MW con la pérdida del turbogenerador 03 en el año 2010. En los últimos años la demanda por carga ha sido mayor que la capacidad de generación, dificultando el cumplir con su filosofía inicial del diseño y obligado a importar permanentemente energía eléctrica desde el SEN.

Debido a la falta de suficientes plantas de generación de energía eléctrica en Venezuela, así como la sobrecarga de la antigua y única red nacional troncal de transmisión, aunadas a la falta de mantenimiento de las redes de distribución regionales, el SEN posee una baja confiabilidad en el suministro del fluido eléctrico, afectando al país con racionamientos y cortes inesperados que inevitablemente también afectan la producción del CPAMC.

Aunado a lo anterior, las fallas de los equipos, en particular el turbogenerador TG-03, retardo en la procura de los repuestos y elementos requeridos para los mantenimientos por los elevados los costos, la limitación del combustible para la generación eléctrica y baja confiabilidad del sistema eléctrico nacional (SEN), crean vulnerabilidad en los procesos de generación eléctrica que apoyan las operaciones de la industria petroquímica venezolana.

Variables del Mantenimiento

Unidad de Análisis: Confiabilidad (MTBF)

Para este elemento de análisis se calculó el MTBF anual para cada uno de los turbogeneradores del Complejo Petroquímico Ana María Campos durante el período comprendido entre el año 2007 hasta el 2018, tomando la información de los reportes operacionales de la Planta de Servicios Industriales del mencionado complejo, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Matriz de Análisis del TG-03 / TG-04 / TG-05 / TG-06 / TG-10
Complejo Petroquímico Ana María Campos

Año	TG-03			TG-04			TG-05			TG-06			TG-10		
	MTBF	MTTR	D												
2007	668	11	0,98	671	16	0,97	501	25	0,92	586	13	0,67	553	83	0,75
2008	568	54	0,83	732	3	1,00	579	45	0,88	628	35	0,95	701	20	0,03
2009	559	16	0,92	628	56	0,92	448	48	0,79	420	48	0,89	559	17	0,33
2010	699	3	0,24	445	27	0,89	444	10	0,96	473	9	0,98	482	15	0,82
2011	0	0	0	629	42	0,90	435	13	0,94	580	14	0,97	699	28	0,96
2012	0	0	0	701	5	0,99	575	34	0,93	582	46	0,92	600	54	0,89
2013	0	0	0	652	19	0,78	654	31	0,94	572	19	0,94	699	1	1,00
2014	0	0	0	0	0	0,00	557	16	0,96	628	5	0,99	637	88	0,62
2015	0	0	0	499	94	0,48	618	67	0,88	669	23	0,94	476	60	0,58
2016	0	0	0	612	141	0,73	732	24	0,97	692	81	0,34	732	119	0,84
2017	0	0	0	460	55	0,48	628	46	0,73	552	4	0,99	596	116	0,18
2018	0	0	0	572	22	0,22	653	65	0,84	573	7	0,98	509	69	0,86

Fuente: Elaboración propia (2019)

Al considerar a 744 como el máximo valor promedio de MTBF y compararlo con la confiabilidad de los turbogeneradores en el año 2018, se puede apreciar que el TG-04 se encuentra 30% por debajo del valor ideal, el TG-05 14% por debajo, TG-06 por debajo del 30% y el TG-10 por debajo del 46%, lo cual demuestra la baja confiabilidad de la generación eléctrica del Complejo.

Confiabilidad (MTBF)

Para este elemento de análisis se calculó el MTBF anual, aplicando la fórmula 1 para cada uno de los turbogeneradores del Complejo Petroquímico Ana María Campos (CPAMC), durante el período comprendido entre el año 2007 hasta el 2018, tomando la información de los reportes operacionales de la Planta de Servicios Industriales del mencionado complejo petroquímico.

Como se observa en el gráfico 1, existe una disminución grande en el MTBF del TG-04, siendo un indicativo de la disminución del tiempo donde la unidad puede operar sin tener alguna interrupción, producto de fallas en el equipo, entre las más significativas tenemos que en el año 2007 hubo problemas mecánicos con un ventilador de tiro forzado, en el año 2009 se tuvo una ruptura la junta de expansión de la turbo bomba, en el año 2010 una falla catastrófica daño al TG-03 y debido a la cercanía del TG-04 también se vio afectado por la explosión y el incendio. El TG-04 tuvo un incremento de MTBF de 24% con respecto al año 2017.

La unidad TG-05 también ha tenido una disminución abrupta y continua en el tiempo, reduciendo su confiabilidad notablemente. Entre las fallas más significativas tenemos que en el año 2017 se dañaron los carbones del recolector de la porta escobillas y en el año 2018 se dañaron las baterías del sistema de arranque. Se observa una variación del 4% de la confiabilidad en el año 2018.

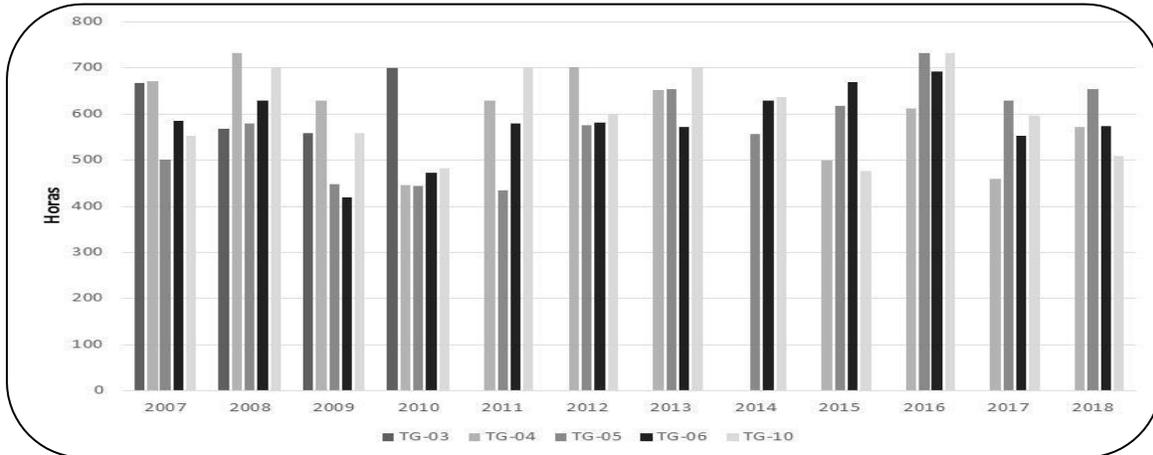


Gráfico 1. MTBF para el TG-03/04/05/06/10
Fuente: Elaboración propia (2019)

El TG-06 ha experimentado una disminución de su confiabilidad operacional debido a la presencia de fallas, entre las más impactantes están la del año 2009 donde hubo presencia de alto líquido en el gas combustible y falló el motor de arranque de la unidad, en el año 2016 se cambió el embobinado al rotor de la unidad. Al igual que el TG-05, este turbogenerador tuvo un incremento del 4% en la confiabilidad con respecto al año previo.

La unidad TG-10 exhibe un comportamiento ligeramente diferente a las otras unidades porque fue adquirido algunos años después de los otros turbogeneradores. Entre las fallas más emblemáticas presentada por esta unidad se encuentran, en el año 2011 se disparó por vibración en la caja reductora, en el año 2017 fallaron los carbones del rotor, en el año 2018 falló el interruptor principal del equipo. Este turbogenerador tuvo una disminución del 17% en el año 2018 de su tiempo promedio entre fallas.

Al considerar a 744 como el máximo valor promedio de MTBF y compararlo con la confiabilidad de los turbogeneradores en el año 2018, se puede apreciar que el TG-04 se encuentra 30% por debajo del valor ideal, el TG-05 por debajo del 14%, el TG-06 por debajo del 30% y el TG-10 por debajo del 46%, lo cual apunta a baja confiabilidad de la generación eléctrica del Complejo Petroquímico Ana María Campos.

Mantenibilidad (MTTR)

Para este análisis se calculó el MTTR anual para cada uno de los turbogeneradores del Complejo Petroquímico Ana María Campos, durante el período comprendido entre el año 2007 hasta el 2018, tomando la información de los reportes operacionales de la Planta de Servicios Industriales del Complejo Petroquímico Ana María Campos, como se observa en el siguiente gráfico 2.

Los años donde se obtuvieron valores mayores a la tendencia de MTTR del TG-04 fueron los años donde se presentaron mayor cantidad de fallas en el Sistema Eléctrico Nacional; estas desconexiones abruptas causaron daños colaterales en las unidades. El problema mecánico con el ventilador de tiro forzado en el año 2007, la ruptura de la junta expansión de la turbo

bomba en el año 2009, la falla catastrófica de unidad vecina del TG-04 contribuyeron al aumento de los valores de MTTR.

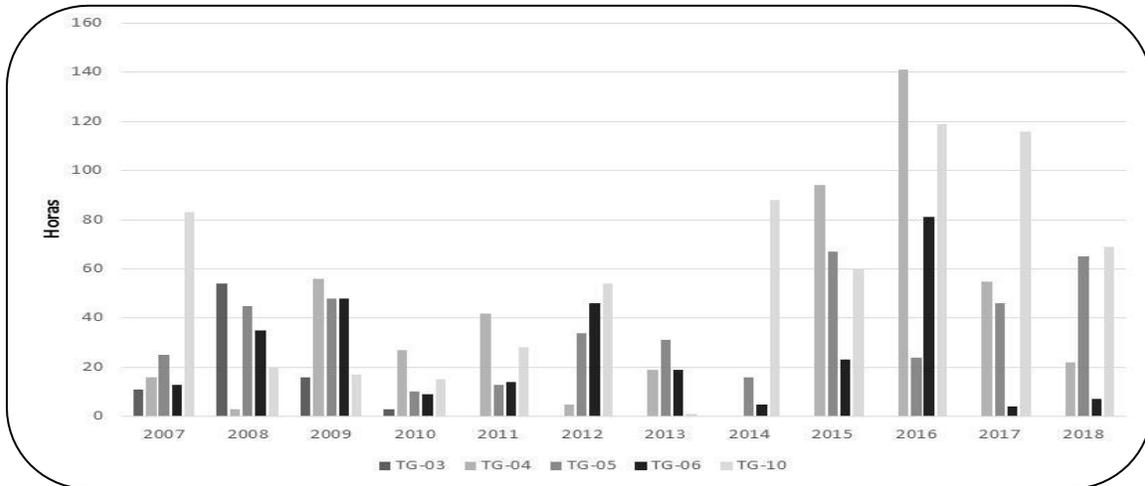


Gráfico 2. MTTR para el TG-03/04/05/06/10
Fuente: Elaboración propia (2019)

La unidad TG-05 también ha experimentado varias fallas en el periodo de tiempo analizado, el daño a los carbones del recolector de la porta escobillas en el año 2017, el daño a las baterías del sistema de arranque ha contribuido a aumentar el tiempo que toma restablecer el servicio del equipo cuando presenta una falla. De manera similar TG-06 ha tenido un comportamiento oscilante al estudiar la variable MTTR, eventos como presencia de alto líquido en el gas combustible en el año 2009 o el cambio el embobinado al rotor de la unidad han afectado los tiempos de reparación de este equipo.

A pesar de tener el TG-10 un comportamiento diferente a las otras unidades al evaluar el MTBF, para el caso de MTTR presenta un comportamiento similar al resto de las unidades, esto es debido a que los cuatro turbogeneradores son afectados al mismo tiempo al presentarse una falla en el SEN. El disparo por alta temperatura de aceite en el año 2009, el disparo por vibración en la caja reductora en el año 2011, el mantenimiento menor en el año 2016 y la falla del interruptor en el año 2018 han contribuido a este indicador.

Disponibilidad (D)

De manera similar a la variable confiabilidad y mantenibilidad, se calculó la D anual para cada uno de los turbogeneradores del CPAMC durante el período comprendido entre el año 2007 hasta el 2018, tomando la información de los reportes operacionales de la Planta de Servicios Industriales (ver Gráfico 3). La disponibilidad es un valor que debería estar cerca del valor uno (1), sin embargo, esta variable ha venido descendiendo con el pasar de los años en todos los turbogeneradores, siendo la unidad TG-04, el más bajo de todos, con 35% por debajo del valor ideal y la más alta el TG-06 con solo 3% por debajo de la disponibilidad total.

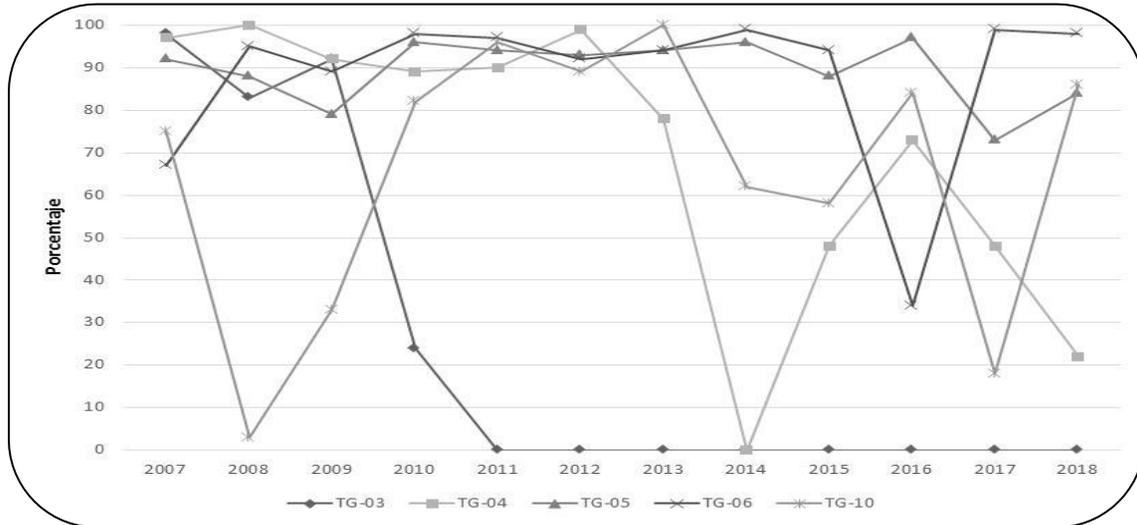


Gráfico 3. Disponibilidad para el TG-03/04/05/06/10
Fuente: Elaboración propia (2019)

Luego de haber analizado las variables de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en los turbogeneradores del CPAMC, se determinó la considerable reducción de la confiabilidad del sistema eléctrico en el tiempo, contrario a lo indicado por los autores consultados Balagurusamy (2017), Birolini (2017), Arques (2009) y Torres (2010), quienes señalan de presentarse una falla en un intervalo de tiempo dado la probabilidad de que en el futuro los equipos puedan generar electricidad normalmente es muy baja, por tanto se necesita un tiempo para detectar en qué componente se ha producido para repararlo o sustituirlo por uno nuevo a fin de dejar el equipo en condiciones de funcionamiento.

Capacidad Instalada vs. Capacidad Real

La capacidad instalada por diseño versus capacidad real en la generación eléctrica para los turbogeneradores de Complejo Petroquímico Ana María Campos se presenta en la tabla 2. Por diseño la Planta de Servicios Industriales del CPAMC contaba con un generador TG-03 que aportaba 42 MW para una generación eléctrica total de 150 MW, sin embargo, debido a un evento catastrófico ocurrido en marzo 2010, la maquina salió de servicio. Considerando que la capacidad instalada es la sumatoria de las capacidades por diseño de los turbogeneradores existentes, se cuenta con una capacidad instalada de solo 108 MW, 42 MW por debajo de lo requerido, sin embargo, motivado a las diferentes fallas ocurridas en este complejo para la fecha de la presente investigación, solo cuenta con una generación total de 91 MW.

Tal y como lo explica el autor Córdoba (2011), se puede inferir que el comportamiento de la capacidad real ha ido reduciéndose progresivamente a través del tiempo, de un valor de 125 MW en el año 2009 hasta llegar a un valor promedio anual en el año 2013 de 91 MW. Se observó una reducción de la capacidad real hasta llegar en el año 2018 a un valor de 72.8%. Ambas variables se han reducido significativamente, en especial después de la pérdida de la unidad TG-03 después del año 2009, como se muestra en el Gráfico 4.

Tabla 2
Capacidad Diseño vs. Real Turbogeneradores CPAMC (MW)

Unidad	Capacidad Diseño	Capacidad Real
TG-03	42	0
TG-04	42	30
TG-05	18	17
TG-06	18	17
TG-10	30	27
TOTAL	150	91

Fuente: Elaboración propia (2019)

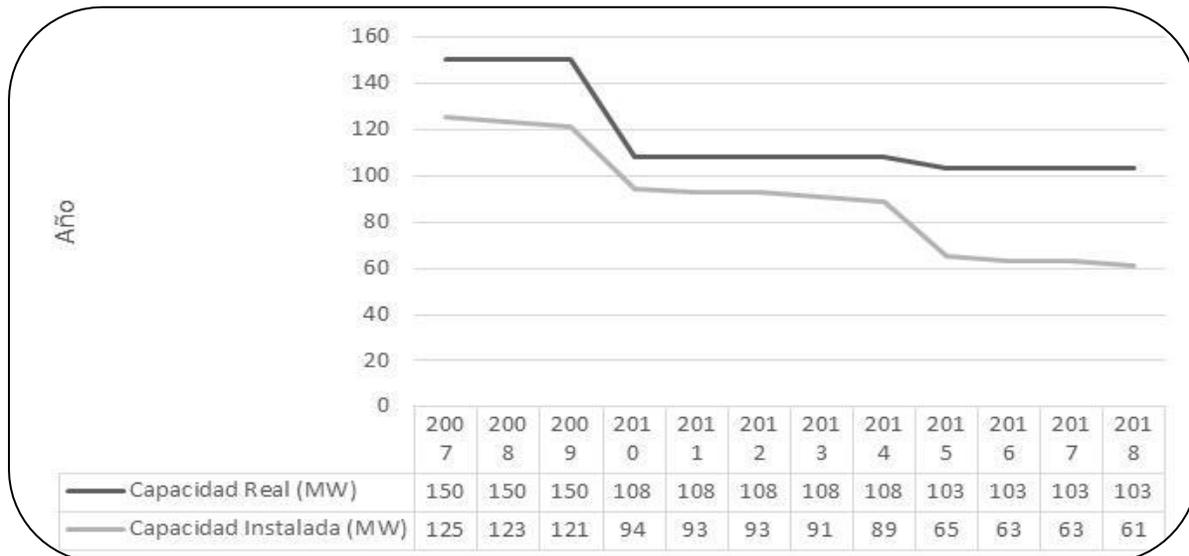


Gráfico 4. Capacidad Instalada vs Real

Fuente: Elaboración propia (2019)

Alternativas Tecnológicas

La investigación permitió recopilar información detallada sobre diferentes alternativas tecnológicas asociadas a la generación eléctrica, posibles de implantar en el Complejo Petroquímico Ana María Campos, ubicado en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, municipio Miranda del estado Zulia: Biomasa (Biogás); Agua (Undimotriz); Eólica (viento); y Solar (Fotovoltaica). En el cuadro 1 se muestran los elementos de análisis considerados, capacidad de generación, eficiencia e impacto ambiental, para cotejar la información de estas tecnologías, luego a continuación se presentan los resultados del análisis de la comparación.

Cuadro 1
Alternativas Tecnológicas Disponibles

Elementos de Análisis			
Alternativa Tecnológica	Capacidad de Generación	Eficiencia	Impacto Ambiental
Biomasa (Biogás)	Por cada m ³ de biogás se puede generar hasta 1.25 kW/h	25-35%	Se depuran los residuos orgánicos
Agua (Undimotriz)	Desde 40 kW hasta 700 kW dependiendo del tamaño del dispositivo	10-35%	No contamina
Viento (Eólica)	Variable, desde bajas a altas potencias dependiendo de las condiciones climáticas	45-55%	No contamina
Solar (Fotovoltaica)	Hasta 150 W/m ²	10-46%	No contamina

Fuente: Elaboración propia (2019)

Capacidad de Generación

Según Cerda (2012), la capacidad de generación eléctrica de la energía a partir de la biomasa es de hasta 1.25 kW/h, indicada como dependencia del volumen por cada m³ de biogás, es decir, la capacidad de generación es proporcional al volumen que se tenga disponible. Por su parte la información recopilada sobre tecnología undimotriz, refiere a uno de los primeros prototipos fue instalado en Japón con una potencia de 40 kW, sin embargo, de acuerdo con Kreith & Krumdieck (2014) existe un nuevo prototipo instalado en el norte de Escocia capaz de generar 750 kW.

Según Orbegozo y Arivilca (2010), la capacidad para la generación eléctrica a partir del viento (eólica) es variable, puede ser elevada o baja por depender directamente de las condiciones climáticas de la zona donde estén instalados los sistemas y aerogeneradores. Con respecto a la tecnología fotovoltaica, Carta (2012) señala que a través de ella se puede lograr una capacidad de generación de hasta 150 W/m². Su capacidad máxima está limitada por el área que abarquen las celdas recolectoras de silicio y las condiciones ambientales del área.

Cuadro 2
Capacidad de Generación Energías Renovables (Unidad de Potencia GW)

Alternativa Tecnológica	2014	2015	2016	2017
Biomasa (Biogás)	101	106	114	122
Agua (Undimotriz)	0.4	0.5	0.5	0.5
Viento (Eólica)	370	433	487	539
Solar (Fotovoltaica)	177	227	303	402

Fuente: REN21 (2018)



De acuerdo con REN21 (2018), en el año 2017 se observó el mayor incremento de la capacidad de generación de electricidad mediante energías alternativas, incrementándose casi un 6% con respecto al año 2016 (ver Cuadro 2). En líneas generales, se incrementó a un 70% la generación alternativa debido a gran parte a las mejoras continuas en los costos competitivos de las tecnologías fotovoltaicas y eólicas. La energía solar fotovoltaica corresponde al 55% de la nueva base instalada de energía renovable en el 2017, la eólica un 29% y la en base a agua un 11%.

Eficiencia

Con respecto al elemento de análisis eficiencia, los resultados arrojaron que las tecnologías de biomasa y eólica presentan el mayor grado de eficiencia. La biomasa se ubica en un rango 25 hasta 35 por ciento y la energía eólica se ubica entre 45 hasta 55 por ciento (Juste, 2010). Por su parte la tecnología undimotriz ha arrojado resultados en los dispositivos instalados durante la fase de experimentación, de una eficiencia en el rango desde 10 hasta 35 por ciento dependiendo de la dirección e intensidad de la ola que llegue al dispositivo (Orbegozo y Arivilca, 2010). Mientras, la tecnología de celdas solares fotovoltaicas posee una eficiencia que se ubica en el rango de 10 hasta 46 por ciento, dependiendo del ángulo de incidencia del sol, la tecnología de las celdas de los paneles y su tiempo de uso (González, 2015).

Impacto Ambiental

De acuerdo con las teorías consultadas, las energías renovables son limpias, no producen residuos contaminantes, ni ponen en peligro la salud de las personas o producen gases de efecto invernadero. Sin embargo, tienen cierto impacto negativo a nivel ambiental, aunque con menor grado de contaminación, comparadas con respecto al uso de los combustibles fósiles, afectan la modificación del paisaje y de los ecosistemas propios de las zonas en las que se implantan. A continuación se presentan los impactos ambientales que ocasionan cada una de las alternativas tecnológicas estudiadas, basados en el estudio de Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica (2014).

Biomasa (Biogás)

- a. La recolección de los residuos forestales y su transporte a las estaciones de combustión produce emisiones en cantidades apreciables que invalidan el supuesto equilibrio en la emisión de gases de efecto invernadero.

Agua (Undimotriz)

- a. Alteración del cauce natural de los ríos, los embalses y represas necesarias para producir esta clase de energía alteran el ecosistema fluvial, se modifica el caudal del río y cambian características fundamentales del agua, como su temperatura o su grado de oxigenación.
- b. Alteración de los ecosistemas puede afectar seriamente a la fauna y la flora de la zona.

Viento (Eólica)

- a. Impacto desde el punto de vista visual. Los aerogeneradores de grandes dimensiones alteran el paisaje, introduciendo un elemento artificial en un ecosistema natural.



- b. Impacto sobre la fauna, dado que los parques eólicos pueden interponerse directamente en las rutas migratorias de algunas aves.
- c. Contaminación sónica, causada por el giro del rotor.

Solar (Fotovoltaica)

- a. Placas solares difíciles de incorporar en el entorno de manera que pasen desapercibidas, deben situarse en zonas despejadas para captar la mayor cantidad de radiación solar posible.
- b. Pérdida de la cobertura vegetal, dependiendo del valor ecológico del ecosistema donde se introducen, se produce un impacto ambiental en mayor o menor medida, siendo especialmente significativo cuando el ecosistema alberga especies protegidas.

Alternativa tecnológica seleccionada

Finalmente, de acuerdo a los elementos de análisis considerados para el cotejo de las tecnologías estudiadas, capacidad de generación, eficiencia e impacto ambiental, los resultados del análisis de la comparación permitieron seleccionar la tecnología fotovoltaica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, basado en la capacidad de generación de hasta 150 W/m², la eficiencia que se ubica en el rango de 10 hasta 46 por ciento y ser una energía renovable limpias.

Propuesta alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano

Alcance

El alcance de la propuesta consiste en la instalación de paneles solares en los techos de los estacionamientos y techos de las edificaciones de las plantas de los complejos petroquímicos venezolanos y su posterior conexión a la red interna del sistema eléctrico, independiente del Sistema Eléctrico Nacional. Con esta primera experiencia venezolana en el uso de la tecnología fotovoltaica en la industria petroquímica, se esperó establecer un sistema aplicable en otras infraestructuras, edificaciones y estacionamientos de diferentes Industrias venezolanas, para garantizar el aprovechamiento racional, óptimo y sostenible de la energía solar.

Estructura de la Propuesta

El área geográfica para el desarrollo de la presente propuesta es el Complejo Petroquímico Ana María Campos (CPAMC), ubicado en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo del estado Zulia, a pocos kilómetros de la localidad de Los Puertos de Altigracia en el Municipio Miranda del estado Zulia. Los paneles fotovoltaicos serán instalados sobre los techos de estacionamiento y techos de las edificaciones de las plantas que conforman este complejo, tal como se muestra en la siguiente figura 1.

estacionamientos y techos de las edificaciones de las plantas del CPAMC, tienen el potencial para producir una generación eléctrica de 1764 kW. La Figura 3 muestra un sistema fotovoltaico típico conectado a la red eléctrica.

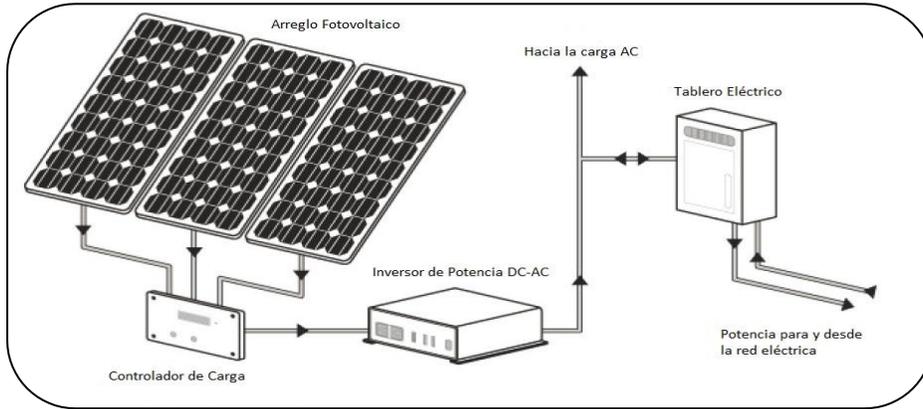


Figura 3. Sistema Fotovoltaico Típico Conectado a la Red Eléctrica
Fuente: Elaboración propia (2019)

El estimado de costos clase V realizado por el PVsyst, arrojó una inversión en materiales y equipos de MMUSD 5,249 y una inversión total de MMUSD 6,57, tomando en consideración el costo de los módulos fotovoltaicos, soportería, inversores, bandejas porta-cables, tubería conduit, cableado, transporte y montaje, incluyendo todas las tareas requeridas para garantizar el aprovechamiento racional, óptimo y sostenible de la energía solar. A continuación, en la figura 4, se presentan los resultados arrojados por el software.

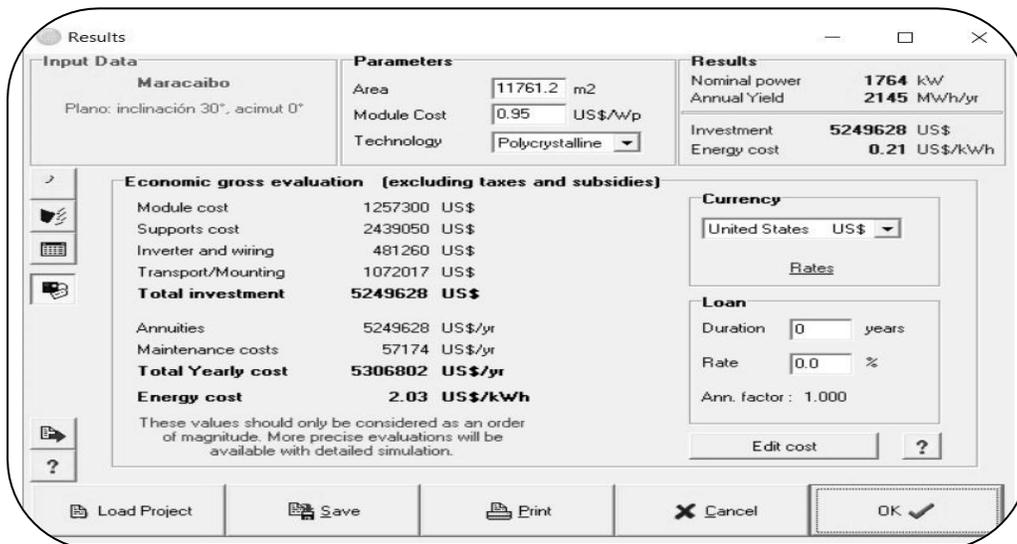


Figura 4. Resultado del PVsyst
Fuente: Elaboración propia (2019)



Conclusiones

El diagnóstico de la situación actual de la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, arrojó reducción considerable del tiempo medio entre fallas, la variable tiempo medio para reparar fue aumentando en el tiempo, esto implicó un aumento en la cantidad de fallas en los turbogeneradores y cada vez que se presenta una falla, mayor es el tiempo para reparar el equipo y ponerlo en servicio de nuevo.

La disponibilidad también se comportó de forma oscilante, durante el periodo de análisis el turbogenerador 04 descendió un 355% del valor deseado, algunos turbogeneradores mejoraron su disponibilidad luego de una parada mayor, sin embargo, la tendencia es a la baja disponibilidad en los equipos, exceptuando al turbogenerador 06 que ha logrado mantenerse en el tiempo.

Luego del evento catastrófico del año 2010, la capacidad instalada del complejo pasó a reducirse de 150 megavatios a 108 megavatios, lo que representa un 72% menos de la capacidad por diseño de los turbogeneradores. Durante el periodo de estudio, del año 2007 al año 2018, se ha disminuido la capacidad de generación del complejo en 48.8%, contando con una capacidad real de 61 megavatios en el 2018, siendo esta incapaz de alcanzar a cubrir la demanda del año 2018 de 146 megavatios, siendo necesario tomar del Sistema Eléctrico Nacional los 85 megavatios necesarios para el funcionamiento de complejo y sus empresas filiales.

Con respecto al segundo objetivo específico, se identificaron las alternativas tecnológicas disponibles para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, biomasa, agua, viento e irradiación solar. Todas tienen la capacidad actual de generar gigavatios de energía eléctrica en diferentes grados de eficiencia de conversión, siendo la más eficiente la energía eólica. Desde el punto de vista ambiental, la biomasa produce contaminación debido a las emisiones de CO₂, aunque en menor cantidad a la generada por medio de combustibles fósiles.

Por último, se seleccionó la alternativa tecnológica para la generación de energía eléctrica en el Industria petroquímico venezolano, la alternativa con mayor posibilidad de crear valor en el tiempo y que puede ser utilizada en todos los complejos petroquímicos de Venezuela fue la tecnología fotovoltaica, una tecnología comercialmente disponible, no contaminante y poseedora de un mantenimiento mínimo.

Referencias bibliográficas

- Alfonso, N. (2010). *Instalaciones de Energía Fotovoltaica*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones.
- Alves, R., Chacón, F. y Toledo, H. (2009). Estudio Técnico-Económico de Factibilidad de Generación Fotovoltaica en Venezuela. II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica.. <https://docplayer.es/14790482-Estudio-tecnico-economico-de-factibilidad-de-generacion-fotovoltaica-en-venezuela.html>
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en las Plantas Industriales*. Santiago, Chile: Editorial Ril.
- Arias, F. (2016). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. Caracas, Venezuela: Espíteme.



- Arques P. (2009). *Ingeniería y Gestión del Mantenimiento en el Industria Ferroviario*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Balagurusamy, E. (2017). *Reliability Engineering*. India: Editorial McGraw-Hill.
- Bautista, S. (2012). *A Sustainable Scenario for Venezuelan Power Generation Industria in 2050 and its Costs*. Elsevier Energy Policy. Recuperado de: <http://www.journals.elsevier.com/energy-policy>
- Birolini, A. (2017). *Reliability Engineering: Theory and Practice*. New York: Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Carta, J. (2012). *Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid, España: Editorial Pearson.
- Cerdá, E. (2012). *Energía Obtenida a partir de Biomasa*. Universidad complutense de Madrid. Madrid, España. Recuperado el 18 de noviembre de 2017, de: <http://www.revistasice.com/index.php/CICE/article/view/6036>
- Córdoba, M. (2011). *Formulación y Evaluación de Proyectos*. Bogotá: Ediciones ECOE.
- Duffuaa, S. y Raouf, A. (2015). *Planning and Control of Maintenance Systems*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Enríquez, G. (2015). *Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica*. México: Editorial Limusa.
- Escalona, E. (2015). *Alternativa Tecnológica para Proyectos de Incorporación de Sistemas de Celdas Fotovoltaicas en Pymes Manufactureras de Maracaibo, Estado Zulia*. Tesis de Maestría. Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín
- García, S. (2013). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*. Madrid, España: Editorial Díaz de Santos
- González, J. (2015). *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial. Madrid.
- Hernández, R., Fernández C., y Baptista, M. (2014) *Metodología de la Investigación*. D.F., México: McGraw Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica (2014). *Análisis de Ciclo de Vida de Ocho Tecnologías de Generación Eléctrica*. Madrid, España: http://proyectoislarenovable.iter.es/wp-content/uploads/2014/05/17_Estudio_Impactos_MA_mix_electrico_APPA.pdf
- Juste, G. (2010). *Estudio Propulsivo de las Misiones de una Aeronave*. ETS de Ingenieros aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 18 de noviembre de 2017, de: <http://labprop.dmt.upm.es/ljuste>
- Kreith, F. & Krumdieck, S. (2014). *Principles of Sustainable Energy Systems*. 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton.
- Méndez, I., (2006) *Alternativas Tecnológicas para la Automatización del Manejo de Tubulares en Empresas de Servicios de Perforación y Rehabilitación de Pozos Petroleros*. Tesis de Maestría. Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín.
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, Ejecución y Control*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Muñoz, N. (2009). *Administración de Operaciones, enfoque de administración de procesos de negocios*. D.F., México: Editorial CENGAGE Learning Editores, S.A.



- Nava, J. (2009). *Teoría de Mantenimiento Fiabilidad*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- Naveda, J. (2016). *Alternativa Tecnológica para la Actualización de la Plataforma de Tecnología Móvil en Empresas Telefónicas de Maracaibo*. Tesis de Maestría. Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín.
- Lleó, A. y Lleó, L. (2014). *Gran Manual de Magnitudes Físicas y sus Unidades*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Orbegozo y Arivilca (2010). *Energía Eólica. Manual Técnico para Pequeñas Instalaciones*. Green Energy Consultoría y Servicios SRL. Recuperado el 18 de noviembre de 2017, de: http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_Eolica.pdf
- Parra, M. y Crespo, I. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos*. Sevilla, España: Editorial INGEMAN.
- Ramírez, S. (2009). *Redes de Distribución Eléctrica*. Manizales. Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- REN21 (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. Recuperado de: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018>
- Sabino, C. (2014). *El Proceso de Investigación*. Editorial Episteme. Caracas, Venezuela.
- Sapag, N. (2011). *Proyectos de Inversión. Formulación y Evaluación*. México: Editorial Prentice Hall.
- Soriano, F. (2008). *Alternativas Tecnológicas para la Medición de Gas Natural en Plantas Compresoras de la Industria Petrolera del Estado Zulia*. Tesis de Maestría. Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín.
- Tamayo y Tamayo, M. (2017). *El Proceso de la Investigación Científica*. 5ta Edición. Editorial Limusa. México.
- Torres, L. (2010). *Mantenimiento, su Implementación y Gestión*. Argentina: Editorial Universitas
- Venezolana de Proyectos Integrados (Vepica, 2013). *Estudio de Demanda Eléctrica Actual y Futura (Nuevos Desarrollos)*. Plan Maestro Complejo Industrial Ana María Campos. Gerencia Proyectos. Zulia