

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD PRIVADA DR. RAFAEL BELLOSO CHACÍN
VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
PROGRAMA: INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE
PROCESOS**



**PARQUE EOLICO OFFSHORE PARA LA ISLA DE SAN ANDRES,
COLOMBIA**

Trabajo presentado como requisito para optar al Grado de Magister en Ingeniería de Control
y Automatización de Procesos

Autor: Ing Wilmer Pinto
Cc: 84.033.115

Tutor: M.S.c. Kenneth Rosillon
C.I: 19.216.499

Maracaibo, Enero de 2018.

**PARQUE EOLICO OFFSHORE PARA LA ISLA DE SAN ANDRES,
COLOMBIA**

VEREDICTO



URBE 14557-1

VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
DECANATO DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
PROGRAMA DE POSTGRADO EN: INGENIERIA DE CONTROL Y AUTOMATIZACION
DE PROCESOS
NIVEL: MAESTRÍAS

VEREDICTO

Quienes suscriben, M.Sc. KENNETH ROSILLON, M.Sc BARBARA ORDOÑEZ Y M.Sc GABRIELA GONZALEZ, designados como jurado examinador por el Consejo Universitario de URBE, para evaluar el Trabajo de Grado Intitulado: PARQUE EÓLICO OFF SHORE PARA LA ISLA DE SAN ANDRÉS, COLOMBIA, que presenta el (la) participante WILMER PINTO, titular de la cedula de identidad extranjera CI: 84033115, para optar al grado de MAGISTER SCIENTIARUM EN INGENIERIA DE CONTROL Y AUTOMATIZACION DE PROCESOS, bajo la Tutoría del(la), M.Sc KENNETH ROSILLON CI.: 19.216.499, reunidos previa convocatoria el día 25 del mes de Enero de 2018, a las 03:00 pm en el edificio sede del Vicerrectorado de Investigación y Postgrado de esta universidad, después de presenciar la defensa de dicho(a) trabajo, ha sido calificado como APROBADO correspondiéndole la valoración de EXCELENTE (20 Puntos), de conformidad con el Reglamento General de Investigación y de Estudios para Graduados de la Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín. Maracaibo, a los 25 días del mes de Enero de 2018




M.Sc. KENNETH ROSILLON
19.216.499
URBE


M.Sc. BARBARA ORDOÑEZ
12.694.680
URBE


M.Sc. GABRIELA GONZALEZ
12.305.105
URBE

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico principalmente a Dios por haberme dado la vida y permitirme alcanzar un nuevo logro en mi formación profesional.

De igual forma a mis padres Wilfrido y Edita, por haberme formado con buenos sentimientos, hábitos y valores para sortear momentos difíciles en la vida.

A mi esposa Paola, por ese apoyo incondicional en todos los momentos buenos y difíciles que hemos sorteado a lo largo de estos 20 años que hemos vivido.

A mis hijos, hermanos, familiares y amigos que de una u otra forma aportaron para poder alcanzar todos los logros alcanzados hasta el momento.

Wilmer David Pinto Brito

AGRADECIMIENTOS

A dios por darme la vida y fortaleza para desarrollar y finalizar este proyecto satisfactoriamente.

A mi esposa, hijos, hermanos y amigos que me apoyaron para alcanzar una nueva meta en mi vida.

Al Msc. Kenneth Rosellón, tutor de este proyecto, quien con su orientación y apoyo incondicional me oriento excelentemente para desarrollar y finalizar de forma satisfactoria este proyecto.

Wilmer David Pinto Brito

ÍNDICE GENERAL

VEREDICTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
INDICE GENERAL.....	VI
INDICE DE CUADROS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	IX
INDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCION.....	1

CAPITULO

I. EI PROBLEMA	3
1. Planteamiento del problema	3
1.1. Formulación de la investigación	9
2. Objetivos de la investigación	9
2.1. Objetivo general	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Justificación de la investigación	10
4. Delimitación de la investigación	12
II. MARCO TEORICO	13
1. Antecedentes de la investigación	13
2. Bases Teóricas	18
2.1. parque eólico offshore para abastecer la demanda de energía eléctrica de la isla de san Andrés.	18
2.1.1. Parámetros y requerimientos de un parque eólico offshore para abastecer la demanda de energía eléctrica de la Isla de San Andrés	22
2.1.1.1. Requerimientos de un parque eólico offshore	22
2.1.2. Diseño de un parque eólico offshore para abastecer la demanda de energía eléctrica de la Isla de san Andrés.	41
2.1.2.1. Diseño Estructural	42
2.1.2.2. Sistema de control	49
2.1.3. Selección de los equipos e instrumentos de un parque eólico offshore para abastecer la demanda de energía eléctrica de la Isla de San Andrés.	55

2.1.3.1. Equipos de un parque eólico offshore para abastecer la demanda de energía eléctrica de la Isla de San Andrés.	56
2.1.3.2. Instrumentos de un parque eólico Off Shore	64
2.2. Sistema de Variables	70
2.2.1. Definición nominal	71
2.2.2. Definición conceptual	71
2.2.3. Definición operacional	72
3. MARCO METODOLÓGICO	74
1. Tipo de la investigación	74
2. Diseño de la investigación	76
3. Población, Muestra y Unidad de análisis	77
4. Técnicas e Instrumentos para la recolección de datos	78
5. Procedimientos de la investigación	80
4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.	84
1. Fase I: Determinación de los parámetros y requerimientos de un parque Eólico Off Shore para la Isla de San Andrés, Colombia	84
2. FASE II. Diseño de un Parque Eólico Off Shore para la Isla de San Andrés.	111
3. FASE III: Selección de equipos e Instrumentos para el parque eólico Off Shore de la Isla de San Andrés	140
4. FASE IV. Validación del sistema parque eólico off shore mediante simulaciones	147
CONCLUSIONES	169
RECOMENDACIONES	171
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	173

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Operacionalización de la variable

73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de velocidades de Weibull.	23
Figura 2. Diferentes diseños de aerogeneradores.	25
Figura 3. Lazo de control abierto	51
Figura 4. Lazo de control cerrado	52
Figura 5. Ubicación geográfica de las zonas no interconectadas en Colombia.	87
Figura 6. Distribución del número de usuarios por estrato y sector 2016	88
Figura 7. Distribución del consumo eléctrico por tipo de usuario 2016	89
Figura 8. Representación geográfica de las zonas donde se presta el servicio de energía eléctrica	90
Figura 9. Rosa de Vientos y mapa eólico del Aeropuerto sesoucentanario, Isla de San Andrés	95
Figura 10. Esquema Eólico propuesto	97
Figura 11. Relación entre el TSR, el número de palas y el rendimiento aerodinámico.	104
Figura 12. Análisis Turbulencia Parques Aerogeneradores	110
Figura 13. Disposición óptima de los aerogeneradores en la Isla de San Andrés	113
Figura 14. Ubicación el parque eólico San Andrés.	110
Figura 15. Sistema Eléctrico de Transformación y distribución.	114
Figura 16. Esquema Unifilar Básico	116
Figura 17. Puesta a tierra del parque eólico Off shore	121
Figura 18. Puesta a tierra	123
Figura 19. Diagrama Unifilar Bucle.	125
Figura 20. Circuito equivalente trifásico	126
Figura 21. Intensidades Eficaces de Corto.	126
Figura 22. Intensidades Eficaces de Corto	128
Figura 23. Dimensiones Acometida subestación	130
Figura 24 Control del parque eólico.	131
Figura 25. Diagrama lógico de arranque del proceso de generación de energía eléctrica del parque eólico Off Shore de la Isla de San Andrés	137
Figura 26. Diagrama lógico de funcionamiento automático del parque eólico	139
Figura 27. Panel de control del sistema eólico San Andrés I	147
Figura 28. Barrido de señales en el sistema eólico San Andrés I	148

Figura 29. Transferencia de carga en el sistema eólico San Andrés I	149
Figura 30. Transferencia de carga en el sistema eólico San Andrés I	150
Figura 31. Panel HMI de funcionamiento del sistema interconectado a la red eléctrica actual de la Isla de San Andrés.	151
Figura 32. Panel HMI de funcionamiento del sistema eólico aislado de la Isla de San Andrés.	153
Figura 33. Panel HMI de monitoreo del sistema eólico aislado de la Isla de San Andrés.	154
Figura 34. Panel de programación del sistema eólico aislado de la Isla de San Andrés.	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica Total en Colombia (GWH).	31
Tabla 2. Crecimiento de la Demanda Proyectada de Energía Eléctrica en Colombia (%).	32
Tabla 3. Potencia total instalada (MW) durante el quinquenio 2011-2015.	33
Tabla 4. Países con más de 4.000 MW eólicos instalados a junio de 2015.	34
Tabla 5 Generación y participación de unidades productoras de energía	92
Tabla 6 Distribución de velocidades de viento en Colombia	94
Tabla 7 Matriz de Selección de Aerogeneradores	96
Tabla 8 Matriz de Valoración Técnica	97
Tabla 9 Matriz de Valoración Económica	98
Tabla 10 Recurso Eólico Disponible en la isla de San Andrés	100
Tabla 11 Densidad del aire a diferentes temperaturas.	101
Tabla 12 TSR para diversas velocidades del viento	102
Tabla 13 Numero de Palas en función del TSR	103
Tabla 14 Factor de corrección de densidad y temperatura	105
Tabla 15 Factor de potencia F	105
Tabla 16 Emplazamientos europeos	109
Tabla 17 Cables trifásicos o ternas de cables instalados al aire.	117
Tabla 18 Intensidades Nominales Conductores.	118
Tabla 19 Intensidades Nominales Conductores de tramo largo.	119
Tabla 20 Perdida Energética Conductores.	120
Tabla 21 Cálculos de la puesta a tierra	122
Tabla 22 Matriz de selección de la arquitectura de red	133
Tabla 23 Selección de los protocolos de comunicación	135
Tabla 24 Selección del Controlador Lógico Programable	141
Tabla 25 Selección de Aerogeneradores	143
Tabla 26 Selección de Protecciones eléctricas	144
Tabla 27 Selección de sub-estación.	145
Tabla 28 Selección de Transformador	146
Tabla 29 Materia prima: Año 1	155
Tabla 30 Materia prima: Año 2	156
Tabla 31 Materia prima: Año 3	156

Tabla 32 SUMINISTROS (Consumibles)	157
Tabla 33 Mobiliario y equipos para la central de control en la planta off shore	158
Tabla 34 RRHH (NOMINA DE PERSONAL)	159
Tabla 35 Descripción de los flujos netos de caja	164
	167

PINTO WILMER. Parque eólico offshore para la isla de san Andrés, Colombia. Universidad Dr. Rafael Beloso Chacín. Programa de Maestría en Ingeniería de Control y Automatización de procesos. Maracaibo, Estado Zulia, 2017.

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito proponer un parque eólico off shore para la isla de San Andrés en el norte Colombiano. La misma estuvo basada en los principios de energía y sustentabilidad de Harper (2015), Electricidad y electrónica por Morón (2009), Chapman (2001) y Fraile Mora (2010) por el área eléctrica respectivamente. La metodología empleada fue de tipo descriptiva con un diseño no experimental. La población y muestra estuvo conformada a través de una única unidad de análisis el cual fue el parque eólico costa afuera San Andrés. Por otra parte se emplearon técnicas como la entrevista no estructurada, la observación directa y documental así como el block de notas como instrumento de recolección de datos. La metodología estuvo dividida en 4 fases que abarcaron desde el cálculo de parámetros y requerimientos para el diseño de este moderno parque eólico hasta la propuesta para solucionar el problema energético de la isla de San Andrés. Como resultados se obtuvieron que se establecieron bases mínimas en la ingeniería conceptual y básica para el desarrollo de un parque eólico automatizado que se localizara en la Isla de San Andrés bajo la modalidad Off Shore el cual contara con 18 aerogeneradores con sistemas de monitoreo y automatizados con emplazamientos marinos produciendo una cantidad de megavatios de 40 en su capacidad instalada aproximadamente, donde económicamente se realizó la evaluación preliminar con un retorno de 3 años en la inversión inicial, colocando así el costo de la energía entre 80-100 dólares lo que hace al cambio en la moneda local de cerca de 250.000 pesos mensuales por familia, esto es atractivo para la comunidad de la isla ya que los mismos tienen un producto comercial que perdura en el tiempo y es el turismo sostenible.

Palabras claves: off shore, aerogeneradores, parque eólico, sistemas de monitoreo, emplazamientos, inversión inicial, ingeniería conceptual

PINTO WILMER. Offshore wind farm for the island of San Andrés, Colombia. Dr. Rafael Belloso Chacín University. Master's Program in Control Engineering and Process Automation. Maracaibo, Zulia State, 2017

ABSTRACT

The purpose of the research was to propose an offshore wind farm for the island of San Andrés in northern Colombia. It was based on the principles of energy and sustainability of Harper (2015), Electricity and electronics by Morón (2009), Chapman (2001) and Fraile Mora (2010) by the electric area respectively. The methodology used was descriptive with a non-experimental design. The population and sample was conformed through a single unit of analysis which was the offshore wind farm San Andrés. On the other hand, techniques such as the unstructured interview, direct and documentary observation as well as the notebook as a data collection instrument were used. The methodology was divided into 4 phases ranging from the calculation of parameters and requirements for the design of this modern wind farm to the proposal to solve the energy problem of the island of San Andrés. As results were obtained that minimum bases were established in the conceptual and basic engineering for the development of an automated wind farm that will be located in the Island of San Andres under the modality Off Shore which will have 18 wind turbines with monitoring systems and automated with marine sites producing an amount of megawatts of 40 in its installed capacity approximately, where economically the preliminary evaluation was made with a return of 3 years in the initial investment, thus placing the cost of energy between 80-100 dollars what makes the change in the local currency of about 250,000 pesos per month per family, this is attractive to the community of the island since they have a commercial product that lasts over time and is sustainable tourism.

Keywords: off shore, wind turbines, wind farm, monitoring systems, emplacements, initial investment, conceptual engineering

INTRODUCCION

La energía eólica es la energía cinética del viento. Para el aprovechamiento de dicha energía se han desarrollado a lo largo de la historia diferentes sistemas tecnológicos. Durante siglos, la aplicación clásica de la energía capturada por las máquinas eólicas ha sido la molienda de grano y el bombeo de agua. Sin embargo, en la actualidad, la aplicación más generalizada de la energía contenida en el viento es la producción de electricidad mediante aerogeneradores que, aprovechando el conocimiento de múltiples disciplinas, se diseñan, construyen y operan con las tecnologías más avanzadas y se conectan, frecuentemente configurando los denominados parques eólicos, a algún tipo de red eléctrica.

Si se analiza la evolución del aprovechamiento de la energía eólica en el mundo a partir de la revolución industrial se desprende que el interés de los distintos gobiernos, fundamentalmente los europeos, por este tipo de energía ha estado íntimamente ligado a crisis bien definidas de energía convencional. Es decir, las crisis energéticas desencadenadas durante los años en que acontecieron las dos guerras mundiales y los períodos que le sucedieron, como consecuencia de las dificultades de aprovisionamiento de combustible; y las crisis energéticas de la década de los setenta, provocadas por el incremento de los precios del petróleo, que infunden miedo al desabastecimiento energético y reavivan el interés por la energía del viento.

No obstante, en las postrimerías del siglo XX, la Comisión de la Unión Europea, con el propósito de disminuir la dependencia energética exterior, fomentar la búsqueda de nuevas y mejores soluciones técnico-económicas al problema del suministro energético y la preocupación por la degradación medioambiental en amplios sectores de los países más desarrollados, incrementa apreciablemente su interés por las energías renovables y

establece diferentes líneas de actuación, tanto de ayuda a la construcción de instalaciones de demostración como, sobre todo, a la investigación y desarrollo tecnológico.

Teniendo en cuenta el carácter aleatorio del viento, el pretender incrementar de forma significativa y eficiente (técnica y económicamente) la contribución de la energía eólica a la cobertura de la demanda total de un país, requiere la instalación de sistemas fiables de conversión de energía eólica en energía eléctrica (siglas en inglés WECS: *Wind Energy Conversion System*), en lugares en los que se haya constatado la existencia de un adecuado recurso eólico, ya que la potencia media generada por un WECS depende directamente de las características del viento y de la máquina eólica utilizada. En este sentido, hay que señalar que se han invertido esfuerzos en llevar a cabo normalizaciones, certificaciones de calidad y homologaciones de sistemas y componentes. Asimismo, se han desarrollado diversas técnicas para evaluar los recursos eólicos, las cuales abarcan desde el análisis de indicadores topográficos, biológicos, geomorfológicos, sociales y culturales a los más sofisticados modelos numéricos de simulación mediante ordenador del comportamiento del viento en una zona dada.

Es por ello que esta investigación plantea un parque eólico off Shore para la comunidad de San Andrés en Colombia. La misma está sustentada por cuatro capítulos bien estructurados: El primer capítulo donde se plantea la problemática, un segundo capítulo con antecedentes y la fundamentación teórica necesaria para el establecimiento de resultados. El capítulo tres, donde se localiza la metodología, procedimientos y fases a establecer en el diseño de un sistema de control avanzado y finalmente el capítulo IV que contiene los resultados de la presente investigación. También se tienen las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios en el ámbito eólico.