



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO: ANÁLISIS DE LAS  
CARACTERÍSTICAS DE VORTEX BLADELESS EN PUERTO CORTÉS,  
HONDURAS**

**PREVIA INVESTIDURA AL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ENERGÍA**

**PRESENTADO POR:**

**21441270 ORLANDO JOSÉ ORDOÑEZ MEOÑEZ**

**ASESOR: ING. ALICIA MARÍA REYES DUKE**

**CAMPUS SAN PEDRO SULA,  
SEPTIEMBRE 2020**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco,

A todos los docentes que estuvieron involucrados en mi aprendizaje desde primaria a secundaria, quienes han sido base de la persona que soy ahora en cuanto a conocimiento y valores. En mención especial a los profesores Josué Ramírez, PhD. Christian Campbell, Lic. Luis Gonzales, Carlos Castillo y Mayra Madrid quienes siempre estuvieron en mi formación.

A todas las amistades que he logrado forjar desde el primer día en la universidad, quienes han sido el principal motivo de mis logros, historias, anécdotas y ayudas que he podido contar y recordar siempre. Principalmente a mis amigos de "El Vaticano" por estar ahí para mí desde el primer día y quienes considero amistades para toda la vida, a "Los kul de eneryi" por ayudarme incondicionalmente desde siempre, porque han estado día a día conmigo durante la carrera y han sido parte de mis logros académicos y personales.

A la universidad por dotarme de experiencias y conocimientos a lo largo de 5 años que me ayudaron a llegar a cumplir mi sueño de ser un ingeniero. En especial, a todos los docentes que me impartieron clases y compartieron sus conocimientos en mí; Ing. Franklin Reyes, Ing. Claudia Paz e Ing. Orlando Aguiluz. Con mención especial a la Ing. Alicia Reyes quien ha sido la persona que ha estado encima de mí desde nuestra primera clase y la considero más que una docente, una amiga y compañera.

A María, por ser la principal razón y guía en mi obtención al título académico, por ser la amistad más incondicional y sincera que tengo y ser la mujer que más quiero; no hubiese querido otra compañera a lo largo de estos años.

## RESUMEN

En el estado de Cortés, muchas ciudades tienen instalaciones de autoconsumo en el sector residencial; sin embargo, Puerto Cortés es una ciudad que actualmente no tiene ningún incentivo o interés en implementar la generación distribuida basada en recursos renovables. Con este criterio se buscó estudiar un recurso renovable apto para las instalaciones de autoconsumo en Puerto Cortés que no sea la energía solar, lo que daría como resultado la energía eólica con la tecnología Vortex Bladeless. Se realizó un análisis técnico del prototipo de Vortex NANO en una zona residencial de Pto. Cortés para determinar su viabilidad mediante el monitoreo de la generación de energía con respecto a la magnitud del viento. Con el análisis con Vortex NANO, se realizó una proyección para Vortex Tacoma utilizando la evaluación del recurso eólico de Puerto Cortés. Validando el análisis del recurso con una estación meteorológica situada en el mismo punto y altura de la instalación con Vortex, se realizó un análisis de coeficiente de potencia para determinar la eficiencia de la generación de energía para la proyección de Vortex NANO y Tacoma en Puerto Cortés. Durante las 3 semanas en las que se monitoreó y analizó Vortex Bladeless, los resultados obtenidos muestran un rendimiento del 30% en condiciones reales; sin embargo, reconociendo el corto período de análisis, estos resultados no reflejarán un rendimiento preciso de Vortex Bladeless. El rendimiento y los resultados del coeficiente de potencia se asemejan al tercer trimestre del año en Puerto Cortés dentro de su recurso eólico. Se llevó a cabo un análisis de perfil de carga para determinar la cobertura de carga que un Vortex puede generar específicamente a un consumidor final cerca del proyecto. Un solo Vortex Tacoma usando proyecciones, puede fácilmente cubrir el 9% de una carga común en promedio cerca del proyecto; sin embargo, usando más dispositivos Vortex Bladeless podría cubrir más demanda de energía dependiendo de la magnitud de la demanda de carga y una posible sinergia entre la generación eólica-solar.

**Palabras clave:** *coeficiente de potencia, perfil de carga, evaluación del recurso, sinergia, Vortex*

## ABSTRACT

In the state of Cortés, many cities have self-consumption facilities in the residential sector; however, Puerto Cortés is a city that does not currently have any incentive or interest to implement distributive generation based on renewable resources. Under this criterion, it was sought to study a renewable resource suitable for self-consumption facilities in Puerto Cortés other than solar energy, resulting in wind energy using Vortex Bladeless technology. A technical analysis of the Vortex NANO prototype was carried out in a residential area of Pto. Cortés to determine its viability by monitoring power generation with respect to the magnitude of the wind. With the analysis con Vortex NANO, a projection for Vortex Tacoma was carried out using the wind resource assessment of Puerto Cortes. Validating the resource analysis with a meteorological station placed at the same point and height of installation with Vortex, a coefficient power analysis was made to determine the efficiency of power generation for Vortex NANO and Tacoma projection in Puerto Cortes. During the 3 weeks where Vortex Bladeless was monitored and analyzed, the results obtained show a performance of 30% in real conditions; however, acknowledging the short period of analysis, these results won't reflect an accurate performance of Vortex Bladeless. Performance and coefficient power results resemble to the third quarter of year in Puerto Cortes within it's wind resource. A load profile analysis was carried out to determine the load coverage that a Vortex can generate specifically to a final consumer near the project. A single Vortex Tacoma using projections, can easily cover 9% of a common load in average near the project; however, using more Vortex Bladeless devices could cover more demand of energy depending on the magnitude of load demand and a possible synergy between wind-solar generation.

**Keywords:** *coefficient power, load profile, resource assessment, synergy, Vortex*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	2
<b>2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA</b> .....	2
<b>2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	2
<b>2.3 JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	3
<b>2.5 OBJETIVOS</b> .....	3
<b>2.5.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	4
<b>2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	4
<b>III. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
<b>3.1 SITUACIÓN ACTUAL</b> .....	5
<b>3.1.1 MACROENTORNO</b> .....	5
3.1.1.1 Chile .....	5
3.1.1.2 México.....	6
<b>3.1.2 RECURSO EÓLICO EN 2019</b> .....	6
<b>3.1.3 RECURSO EÓLICO EN 2020</b> .....	7
<b>3.1.4 SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN</b> .....	7
<b>3.2 RECURSO EÓLICO</b> .....	8
<b>3.2.1 APROVECHAMIENTOS</b> .....	9
<b>3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO</b> .....	9
<b>3.2.3 MAGNITUD DEL VIENTO SEGÚN ALTURA</b> .....	11
<b>3.2.4 COEFICIENTE DE POTENCIA</b> .....	15
<b>3.3 CONCEPTO EÓLICO</b> .....	16
<b>3.3.1 LÍMITE DE BETZ</b> .....	17
<b>3.3.2 NÚMERO DE REYNOLDS</b> .....	19
<b>3.3.3 PERFILES DE BAJO NÚMERO DE REYNOLDS</b> .....	19
<b>3.4 FUNDAMENTOS PARA UN NUEVO CONCEPTO</b> .....	20
<b>3.4.1 AEROELASTICIDAD</b> .....	21

3.4.2 RESONANCIA.....	21
3.4.3 VÓRTICES DE VON KÁRMÁN.....	22
3.5 AEROGENERADOR VORTEX BLADELESS .....	22
3.5.1 GEOMETRÍA DE ESTRUCTURA.....	23
3.5.2 COMPONENTES DE ESTRUCTURA.....	24
3.5.3 CONVERSIÓN DE ENERGÍA .....	25
3.5.4 MANTENIMIENTO .....	27
3.5.5 IMPACTO AMBIENTAL .....	27
3.5.6 EMPLAZAMIENTO .....	28
3.5.7 VORTEX NANO.....	28
3.5.8 TEORÍAS DE SUSTENTO .....	28
IV. METODOLOGÍA .....	30
4.1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
4.2 ENFOQUE .....	30
4.3 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	31
4.3.1 MATRIZ METODOLÓGICA .....	31
4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS .....	33
4.4.1 TÉCNICAS .....	33
4.4.2 INSTRUMENTOS .....	34
4.4.2.1 CAD SolidWorks Versión 2019 .....	34
4.4.2.2 Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) .....	34
4.4.2.3 FreeCAD Versión 0.18 .....	35
4.5 MATERIALES.....	35
4.5.1 VORTEX NANO.....	35
4.5.2 ANEMOMETRO DE BOLSILLO .....	35
4.5.3 ACUMULADOR DE ENERGÍA.....	36
4.5.4 ESTACIÓN METEREOLÓGICA .....	36
4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....	36
4.6.1 ANÁLISIS TÉCNICO.....	36
4.6.1.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO .....	37

4.6.1.2 RENDERIZADO DEL MODELO 3D.....	38
4.6.1.3 INSTALACIÓN .....	38
4.6.1.4 CALIBRACIÓN DE EQUIPO .....	38
4.6.1.5 MEDICIÓN Y MONITOREO.....	39
<b>4.6.2 ANÁLISIS DE DEMANDA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.6.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.....</b>	<b>40</b>
<b>4.6.4 ANÁLISIS DE MODIFICACIÓN DE VARIABLES .....</b>	<b>40</b>
<b>4.7 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....</b>	<b>40</b>
<b>4.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.8 LIMITANTES .....</b>	<b>43</b>
<b>4.8.1 UBICACIÓN DE ESTUDIO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.8.2 TÉCNICAS DE MEDICIÓN .....</b>	<b>43</b>
<b>4.8.4 DAÑO DE EQUIPO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.8.5 ACCESO A INFORMACIÓN.....</b>	<b>43</b>
<b>V. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 ANÁLISIS DE VORTEX .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1.1 COMPONENTES .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 ANÁLISIS DE DEMANDA .....</b>	<b>45</b>
<b>5.2.1 CONSUMO HISTÓRICO .....</b>	<b>45</b>
<b>5.2.2 PERFIL DE CARGA.....</b>	<b>46</b>
<b>5.3 ANÁLISIS TÉCNICO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA UBICACIÓN .....</b>	<b>48</b>
<b>5.3.3 METEOROLOGÍA DEL LUGAR.....</b>	<b>49</b>
5.3.3.1 UMA PUERTO CORTÉS.....	49
5.3.3.2 MEDICIÓN MANUAL CON ANEMÓMETRO .....	52
<b>5.3.4 VORTEX NANO Y PROYECCIÓN TACOMA.....</b>	<b>54</b>
5.3.4.1 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN.....	55
5.3.4.2 RENDIMIENTOS TEÓRICOS.....	55
5.3.4.3 DENSIDAD DE POTENCIA VORTEX NANO.....	58

5.3.4.4 POTENCIA EN EL VIENTO PTO. CORTÉS.....	59
5.3.4.5 COEFICIENTE DE POTENCIA.....	60
<b>5.4 DISEÑO DE MODELO 3D .....</b>	<b>62</b>
<b>5.4.1 INTEGRACIÓN DE PARTES .....</b>	<b>62</b>
<b>5.4.2 VOLUMEN DE CONTROL.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.3 PRUEBAS.....</b>	<b>64</b>
<b>5.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN .....</b>	<b>64</b>
<b>5.6.1 METEOROLOGÍA .....</b>	<b>64</b>
<b>5.6.2 POTENCIA DISPONIBLE.....</b>	<b>65</b>
<b>5.6.3 DEMANDA-GENERACIÓN.....</b>	<b>67</b>
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>VIII. APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>71</b>
<b>IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL / TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>72</b>
<b>X. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>
<b>XI. ANEXOS .....</b>	<b>76</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1. Tipos de aerogeneradores</b> .....	1
<b>Ilustración 2. Esquema de vientos según latitud</b> .....	8
<b>Ilustración 3. Distribución del viento en un emplazamiento</b> .....	10
<b>Ilustración 4. Inestabilidad atmosférica</b> .....	12
<b>Ilustración 5. Estabilidad atmosférica</b> .....	13
<b>Ilustración 6. Perfil vertical en atmósfera estable</b> .....	13
<b>Ilustración 7. Perfil vertical en atmósfera inestable</b> .....	14
<b>Ilustración 8. Coeficiente de potencia</b> .....	15
<b>Ilustración 9. Potencia teórica, Límite Betz, Potencia turbina</b> .....	16
<b>Ilustración 10. Límite de Betz</b> .....	18
<b>Ilustración 11. Patrón de vórtices obtenido por CFD</b> .....	21
<b>Ilustración 12. Vortex Bladeless</b> .....	22
<b>Ilustración 13. Esquema de estructura geométrica</b> .....	24
<b>Ilustración 14. Esquema de sintonizado</b> .....	26
<b>Ilustración 15. Esquema de enfoque</b> .....	31
<b>Ilustración 16. Variables de investigación</b> .....	33
<b>Ilustración 17. Logo del programa SolidWorks</b> .....	34
<b>Ilustración 18. Logo plataforma PVGIS</b> .....	34
<b>Ilustración 19. Logo del programa FreeCAD</b> .....	35
<b>Ilustración 20. Cronograma de análisis</b> .....	42
<b>Ilustración 21. Perfil de carga del abonado</b> .....	46
<b>Ilustración 22. Ubicación del proyecto</b> .....	47
<b>Ilustración 23. Radar meteorológico en Pto. Cortés</b> .....	48
<b>Ilustración 24. Magnitud de viento trimestral</b> .....	50
<b>Ilustración 25. Magnitud de viento mensual</b> .....	51
<b>Ilustración 26. Magnitud de viento diaria</b> .....	51
<b>Ilustración 27. Medición magnitud de viento 9:00-12:00</b> .....	52
<b>Ilustración 28. Medición magnitud de viento 14:30-17:30</b> .....	53
<b>Ilustración 29. Perfil de recurso eólico para 1 día atípico</b> .....	54
<b>Ilustración 30. Rendimiento teórico Vortex NANO</b> .....	56
<b>Ilustración 31. Rendimiento teórico Vortex Tacoma</b> .....	57
<b>Ilustración 32. Curva de potencia Vortex NANO</b> .....	58
<b>Ilustración 33. Gráfico de <math>C_p</math> para Vortex NANO</b> .....	61
<b>Ilustración 34. Modelo final renderizado</b> .....	62
<b>Ilustración 35. Soporte final y renderizado</b> .....	62
<b>Ilustración 36. Base final y renderizada</b> .....	63
<b>Ilustración 37. Modelo final y renderizado sin mástil</b> .....	63

<b>Ilustración 38. Validación de datos meteorológicos.....</b>	<b>65</b>
<b>Ilustración 39. Potencias disponibles NANO .....</b>	<b>66</b>
<b>Ilustración 40. Potencia disponible Tacoma .....</b>	<b>67</b>
<b>Ilustración 41. Correlación consumo-generación.....</b>	<b>68</b>

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

<b>Ecuación 1. Variación del viento.....</b>	<b>14</b>
<b>Ecuación 2. Variación del viento simplificada .....</b>	<b>15</b>
<b>Ecuación 3. Masa de corriente .....</b>	<b>17</b>
<b>Ecuación 4. Potencia del viento .....</b>	<b>17</b>
<b>Ecuación 5. Potencia extraída del viento.....</b>	<b>18</b>
<b>Ecuación 6. Potencia antes de ser extraída.....</b>	<b>18</b>
<b>Ecuación 7. Ratio de potencias .....</b>	<b>18</b>
<b>Ecuación 8. Número de Reynolds .....</b>	<b>19</b>
<b>Ecuación 9. Sincronía entre vórtices y el mástil .....</b>	<b>23</b>
<b>Ecuación 10. Potencia del viento .....</b>	<b>25</b>
<b>Ecuación 11. Área de barrido Vortex NANO .....</b>	<b>26</b>
<b>Ecuación 12. Frecuencia de amplitud de oscilación.....</b>	<b>26</b>

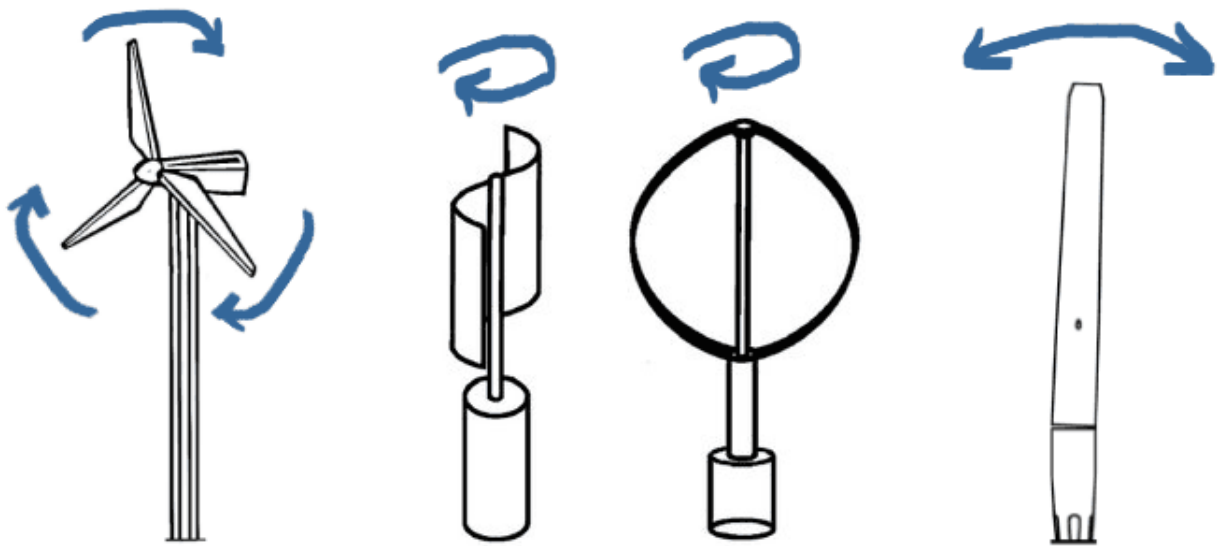
## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Coeficientes de fricción</b> .....	14
<b>Tabla 2. Matriz metodológica</b> .....	32
<b>Tabla 3. Matriz de decisión</b> .....	37
<b>Tabla 4. Validación de datos</b> .....	41
<b>Tabla 5. Consumo Histórico</b> .....	45
<b>Tabla 6. Promedios al año</b> .....	49
<b>Tabla 7. Máxima al año</b> .....	49
<b>Tabla 8. Mínima al año</b> .....	49
<b>Tabla 9. Especificaciones técnicas Vortex NANO</b> .....	55
<b>Tabla 10. Especificaciones técnicas Vortex Tacoma</b> .....	57
<b>Tabla 11. Premisas para cálculo de potencia del viento; Densidad de aire</b> .....	59
<b>Tabla 12. Premisas para cálculo de potencia del viento; Viscosidad</b> .....	59
<b>Tabla 13. Potencia disponible en el viento, altura=4mts</b> .....	59

## I. INTRODUCCIÓN

Observando el auge que está teniendo Honduras en la producción de energía de distribución con la energía solar FV, semejante el caso en España, se buscó introducir otro tipo de energía renovable con la misma cualidad de distribución de fácil acceso en sectores urbanos o residenciales y es el aerogenerador Vortex quien cumple con estas. El desarrollo actual del prototipo se enfoca en la generación de energía en campo on-grid y off-grid, destinado a trabajar como única fuente de generación, pero proyectando y analizando las posibilidades de producir energía en sinergia en instalaciones híbridas con otros dispositivos Vortex o módulos solares.

Se pretende realizar el análisis técnico de la tecnología Vortex Bladeless aplicándolo en el sector residencial de Puerto Cortés bajo un monitoreo constante. El aerogenerador Vortex aprovecha ráfagas de viento pequeñas para convertir la energía cinética del viento en eléctrica por medio de una alternativa patentada a la inducción electromagnética convencional de cualquier tipo de energía renovable excluyendo a la solar. Esta nueva conversión de energía se basa en el concepto de resonancia estudiado en el puente de Tacoma Narrows.



***Ilustración 1. Tipos de aerogeneradores***

Fuente: (Gonzales, 2019)

## **II. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA**

En este capítulo se detallará la estructura del planteamiento del problema, donde se podrá exponer y definir el problema que se está atacando con el proyecto de investigación; detallando los precedentes del problema, definiendo los objetivos de la investigación y la justificación del porqué realizar este proyecto de investigación.

### **2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA**

La ciudad de Puerto Cortés no aprovecha el recurso eólico ni solar disponible en la zona, tampoco realiza o hay algún interés de parte de las autoridades en estudios sobre nuevas medidas de autoconsumo o generación. Resultando en un desarrollo nulo para la ciudad en materia de energía y diversidad sustentable en general.

Existe una inmadurez en el avance tecnológico de Vortex Bladeless debido a los pocos estudios que se han hecho hasta hace poco tiempo que no le dan la solidez en poder ingresar a la producción en masa para distribuir el dispositivo al mercado residencial y comercial. La población y muestra para la compañía deberá ser tan extensa como sea posible y sus análisis datan con estudios realizados solo en España, limitando su nicho de mercado.

Puerto Cortés es una ciudad que no cuenta con el impulso o incentivo por parte de las autoridades para la implementación de instalaciones de generación de autoconsumo. Existe una necesidad de diversificar la matriz de consumo de los abonados residenciales que actualmente dependen del 100% del servicio de la EEH cuando se reconoce el gran potencial eólico y solar de la zona.

### **2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Existe una necesidad para la zona de Puerto Cortes en diversificar su generación y autoconsumo eléctrico, donde predomine la instalación de generación de energía renovable. Sin embargo, no existe en Puerto Cortés por parte de las autoridades competentes ni de sector privado el interés en el estudio de factibilidad de instalaciones de autoconsumo de cualquier índole. Puerto Cortés es una ciudad donde se desaprovecha el recurso eólico cuando se podría

instalar aerogeneradores Vortex Bladeless una vez dentro del mercado; sin embargo, análisis y estudios para implementar correctamente esta tecnología no existe en el sector y es necesario principalmente para el sector residencial y comercial en la ciudad.

## **2.3 JUSTIFICACIÓN**

Las fuentes de energía de distribución o *in situ* representan una autonomía mayor para el consumidor final y una huella de carbono reducida. Al tener una gran mayoría de instalaciones solares FV, se reconoce que, con el paso del tiempo la generación de energía se irá reduciendo y proporcionalmente inverso sería el sobredimensionamiento del inversor. Vortex sería una solución rápida para los arreglos solares en el sector residencial manteniendo la generación de energía en un rango nominal. Incluso, Vortex podría ser utilizado en el sector residencial para las personas que no cuentan con espacio o recurso solar suficiente para una instalación y es en ambos casos donde es atractivo para un consumidor final por qué optar por una instalación de dispositivos Vortex de manera individual o en sinergia con otra fuente.

## **2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cómo se comporta la demanda en el sector residencial de Cortés, Honduras?
2. ¿Qué diferencia porcentual de generación tendrá Vortex si se presentan obstáculos?
3. ¿Qué rendimiento tendrá Vortex con respecto a la magnitud del viento?
4. ¿Cómo será el comportamiento de la demanda de energía y la generación de energía promedio diario?
5. ¿Qué otras aplicaciones pueden ser recomendadas para utilizar Vortex?

## **2.5 OBJETIVOS**

En esta sección se presenta el objetivo general del proyecto de investigación y los objetivos específicos esperados al culminar el proyecto.

### **2.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la viabilidad técnica partiendo del rendimiento en generación del dispositivo Vortex haciendo un análisis en campo para validar su implementación en el sector residencial de Puerto Cortés, Honduras y poder generar un listado de recomendaciones u opciones de implementación adicionales del Vortex para trabajar en conjunto con otras fuentes de energía.

### **2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Elaborar un análisis correlacional entre demanda-generación en el sector residencial.
2. Realizar el análisis de generación con obstáculos alrededor del Vortex.
3. Elaborar un diagrama de rendimiento de Vortex considerando la generación de energía con respecto a la magnitud del viento incidente.
4. Analizar el comportamiento de generación entre Vortex NANO y Vortex Tacoma con el mismo recurso eólico y rugosidad presente.

### III. MARCO TEÓRICO

El marco teórico definirá todas las teorías de sustentación principales y adyacentes al proyecto de investigación. Definiendo conceptos, ecuaciones e ilustrando casos o ejemplos para dotar de mayor comprensión al lector. Actualmente, las energías renovables tienen un auge en las instalaciones de generación y autoconsumo, partiendo de ese caso se realiza un marco teórico con conceptos eólicos y todas sus características. De igual manera, se realiza el marco teórico para un prototipo eólico.

#### 3.1 SITUACIÓN ACTUAL

El conocimiento del estado actual del contexto que abarca el proyecto de investigación es indispensable para poder realizar conclusiones en base a un antes y después de realizar el proyecto. Detallando la información en un macroentorno y en un entorno nacional en cuando a políticas de autoconsumo y recurso eólico en el país.

##### 3.1.1 MACROENTORNO

Haciendo una analogía acerca del sector de autoconsumo, se eligió a Chile para ser comparada con Honduras dado que es uno de los mejores ejemplos a seguir que tienen los demás países salvo a Guatemala y Costa Rica que cuentan con condiciones eléctricas y mercados ejemplares.

###### 3.1.1.1 Chile

Hasta Febrero del presente año se registraron 5,842 instalaciones a nivel nacional de generación distributiva (*in situ*), estas instalaciones de autoconsumo sumadas totalizan a una potencia instalada de 46.3 MW y conforman instalaciones individuales y colectivas; es decir, hay instalaciones de autoconsumo que abastecen la demanda de un sector con más de 2 abonados. Según la Superintendencia de electricidad y combustibles de Chile con respecto al 2018, tuvo un aumento de potencia instalada en este sector de generación de 9.6 MW hasta los presentes 46.3 MW (SEC, 2020).



### 3.1.1.2 México

La Comisión Reguladora de Energía de México aprobó en 2019 los acuerdos correspondientes a la planificación del gobierno de México para beneficiar el sector de dimensionamiento solares para una generación distributiva. El plan se enfoca en incentivar a la creación de instalaciones colectivas por medio de techos en el sector residencial, asemejándose a lo realizado en países como Brasil e India. Este acuerdo es destinado a zonas muy aledañas y a las MiPymes, quienes serán los más beneficiados dado que representan un 80% de empleos informales (PV Magazine México, 2020). Las medidas serán impulsadas por la Confederación de Cámaras Nacionales de Comercio, Servicios y Turismo con el objetivo de cumplir los requisitos del acuerdo del ODS.

### 3.1.2 RECURSO EÓLICO EN 2019

Para realizar un análisis de situación actual del recurso eólico, se debe definir en contexto y con precedentes la historia de generación eólica de Honduras. El aprovechamiento eólico de Honduras empezó en 2011 incorporándose al SIN con una instalación total de 102 MW. Para 2018 esta potencia instalada aumentó a 225 MW representando un 9% de la energía corriente en el SIN (Salgado et al., 2018). Para 2019, la Secretaría de Energía por medio del informe anual de despacho de energía determinó que la generación total eólica de Honduras fue de 818.29 GWh representando un 7.67% de participación en el SIN debido al incremento de otras fuentes renovables.

En total resultó en un 53% de participación total de energía renovable por encima de la participación térmica. Del total de esa participación se desglosa en el informe del ODS del resumen energético del 2019 para el aporte eólico del 7.67% total de la siguiente manera:

- Cerro de Hula: 404.83 GWh representando un 49.47% de participación.
- San Marcos: 206.42 GWh representando un 25.23% de participación.
- Chichayote: 207.04 GWh representando un 25.30% de participación.

### **3.1.3 RECURSO EÓLICO EN 2020**

Actualmente, la participación eólica en el país representa un 15.5% en tiempo real (ODS, 2020). Esto debido a la necesidad de sustentar la energía corriente en el SIN con potencia de carácter más firme por la situación sanitaria del SARS-CoV-2. Sin embargo, las proyecciones realizadas por el ODS para las semanas 16 a la 52 del año (Abril-Diciembre) determinaban una generación de 488.75 GWh representando un 6.71% de la generación eléctrica total del SIN; 52% renovable, 47% térmica y 1% MER. Esto representa un déficit del 1.9% en cuanto a generación de energía sin contabilizar la energía no suministrada que afecta a los costos marginales.

Desde Abril del hasta Junio, ha habido una generación de 103.5 GWh y se desglosa de la siguiente manera:

- Cerro de Hula: 44.7 GWh representando un 43.2% de participación.
- San Marcos: 30.16 GWh representando un 29.1% de participación.
- Chichayote: 28.68% GWh representando un 27.7% de participación.

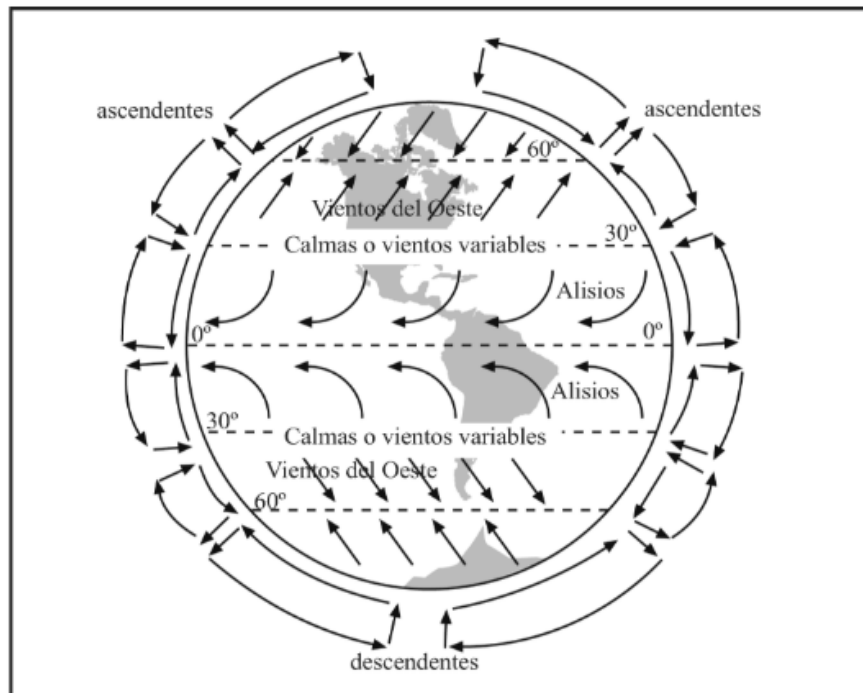
### **3.1.4 SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN**

La cobertura del SIN en Honduras es de un 83%, resultando en la aparición de otras entidades que manejen todos los sectores y agentes del mercado eléctrico como en Roatán con RECO, Puerto Lempira con INELEM, Guanaja con BELCO y Útila con UPCO; en estos lugares es muy difícil extender líneas de distribución y/o transmisión de energía. Actualmente, en estos sistemas aislados se reportan 34.8 MW instalados donde 3.9 MW son de sistemas de autoconsumo a partir del recurso eólico (Salgado et al., 2018). Sin embargo, la autonomía de estos lugares no reduce las deficiencias en el servicio de distribución de la ENEE a través de EEH.

El informe AOMEN (2019) elaborado por el ODS, reporta la tabulación de fallas en el servicio de distribución para la región del norte; San Pedro Sula, Choloma, Progreso y Puerto Cortés. Para 2019 se reportaron 558 desconexiones; para un total de 386 horas sin servicio de energía en sectores de distribución que representan 2.46 GWh no suministrados, anexo (1,2).

### 3.2 RECURSO EÓLICO

Los vientos se definen como el flujo de masas de aire, caracterizados por velocidades y direcciones. Los flujos o movimiento del aire se generan debido al calentamiento de la atmósfera en cada zona por el sol, se puede considerar que el recurso eólico es una forma indirecta de energía solar (Talayero & Martínez, 2020). Los aires en el ecuador son más ligeros y de menor densidad por tener la latitud más cercana al sol y por consecuencia en calentamiento más fuerte que otras latitudes. El aire caliente asciende y fluye hacia los polos donde el aire cerca de la superficie es más frío. Este movimiento cesa a unos 30°N y 30°S, donde el aire empieza a enfriarse y concentrarse, y en las capas más bajas de la atmósfera tiene lugar un flujo de retorno de este aire más fresco.



**Ilustración 2. Esquema de vientos según latitud**

Fuente: (Talayero & Martínez, 2020)

Honduras al ser un país cercano al ecuador, su recurso eólico se caracteriza por alisios y de flujo hacia el ecuador. El movimiento de rotación de la Tierra desvía a los alisios hacia el occidente, y por ello soplan del noreste (NE) al suroeste (SO) en el hemisferio norte y del sureste (SE) hacia el noroeste (NO) en el hemisferio sur.

### 3.2.1 APROVECHAMIENTOS

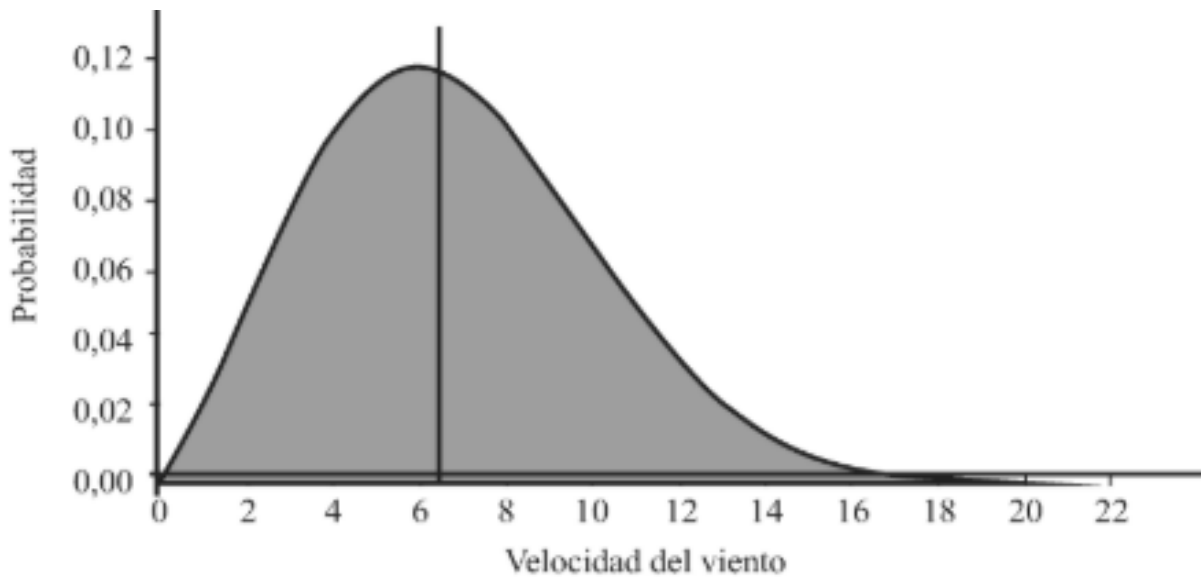
El aprovechamiento del recurso eólico como tal puede ser para distintas aplicaciones que no se limita solo hacia la generación de energía. Se mencionan las siguientes aplicaciones:

- Ventilación natural: Concepto semejante a lo que es el aprovechamiento de luz solar por medio de ventanas, una edificación que toma las ventajas de un recurso renovable (viento) para regular o variar la ventilación temperatura y humedad para llegar a una temperatura de confort se le conoce como edificación bioclimática. Es una forma gratuita de aprovechar el recurso solar directo (luz) e indirecto (viento) para poder tener menor consumo en verano e invierno.
- Navegación: El aprovechamiento del viento para navegación de barcos o veleros es la más antigua de todas. Aunque ya no se fabriquen barcos de navegación turística, todavía hay barcos que navegan bajo este antiguo concepto. Por ejemplo, los buques de escuela que son barcos utilizados para el entrenamiento de marinos. En la actualidad, se ha desarrollado la navegación eólica en el sector terrestre; el carro vela holandés clase 5 es un vehículo que puede alcanzar una máxima de 200 km/hr (Domínguez, 2020).
- Molinos: los molinos son artefactos que sirven para la molienda de granos o bombeo de agua desde un acuífero o pozo, ambos utilizando la energía eólica para su mecanismo.
- Generadores eólicos: un aerogenerador es un instrumento capaz de transformar la energía cinética del viento a energía eléctrica bajo un mecanismo de conversión mecánico. Con los avances tecnológicos cada vez se van aumentando en rendimiento y eficiencia de estos dispositivos.

### 3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO

Se han utilizado metodologías estadísticas para estudiar el comportamiento del viento en un intervalo de tiempo definido. Para entender el comportamiento aleatorio del recurso eólico en un año, se han hecho estudios utilizando una distribución de frecuencias por intervalos de velocidad. Para ilustrar la distribución de frecuencias se utilizan gráficos de histograma basados en las frecuencias relativas de la velocidad del viento.

Registrando la velocidad del viento en un intervalo de tiempo de 1 año se puede obtener de resultados que, en la mayoría de las áreas medidas, los vientos fuertes son poco comunes y que los vientos moderados y frescos tienen una tendencia más constante. La variación del viento en un emplazamiento tiene una velocidad o magnitud promedio de 7 m/s y se observa en la siguiente ilustración utilizando la distribución de Weibull:



**Ilustración 3. Distribución del viento en un emplazamiento**

Fuente: (Sánchez, 2016)

Bajo este concepto y el análisis hecho por Enrique Martínez, se realiza un análisis por debajo de la curva donde se determina que *“El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100%”* (Talayero & Martínez, 2020). El área sombreada tiene una línea divisora que está ubicada a aproximadamente 6.5 m/s, significa que la mitad del tiempo el viento será de magnitud inferior a esa media y la otra mitad superior a la misma media de 6.5 m/s. La forma en que se distribuyen las velocidades del viento en el diagrama distribución de Weibull no tienen una simetría, la velocidad media es de 6.5 m/s, pero el promedio es de 7 m/s. Esto se debe a que, en ciertos periodos cortos de tiempo, existirán vientos de magnitud muy altos, pero bajo ninguna

consistencia. Al contrario, los vientos con magnitud cercana a 5.5 m/s son las más predominantes a lo largo del año; el valor modal de la distribución.

Si se multiplica cada instante o pequeño intervalo de viento con la probabilidad de incidencia de ese viento específico, sumando cada uno de estos resultados, se obtendrá el valor promedio de incidencia de viento; en la distribución Weibull 7 m/s según el emplazamiento usado. La distribución del viento dependerá de la ubicación geográfica de la zona, específicamente de la latitud en que se presente la muestra, ya que dependerá de las variables como condiciones climatológicas, rugosidad y de superficie; este último por conceptos de burbuja de aire y capa límite de flujo del viento.

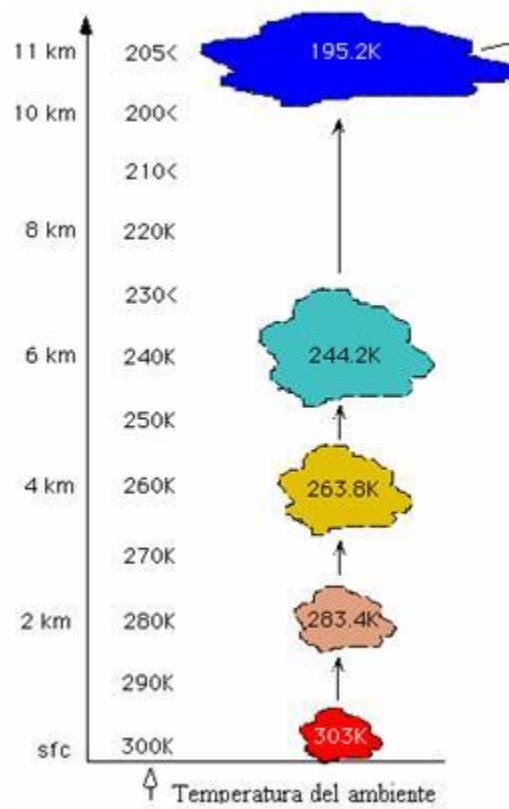
### **3.2.3 MAGNITUD DEL VIENTO SEGÚN ALTURA**

El viento tendrá un incremento en magnitud según su inmediatez en aprovechamiento por altura. Es decir, el aerogenerador podrá captar en el mismo sitio un mayor potencial de energía eólica a una altura más elevada. Esta altura tendrá influencia en el rendimiento del aerogenerador, misma que estará limitada a un entorno de 1,000 mts sobre el nivel del mar; gradiente de altura.

Esa variación de potencial eólico con respecto a la altura dependerá de la estabilidad atmosférica (Domínguez, 2020). La atmósfera puede ser estable o inestable y tendrá un concepto distinto en meteorología y termodinámica. Para la meteorología, una atmósfera inestable se asocia con un cielo nuboso y con precipitaciones, lo contrario para una atmósfera estable. También se puede tener un cielo despejado de atmósfera inestable y cielo con nubosidad de atmósfera estable. Esto es posible por la termodinámica. En termodinámica, la atmósfera será estable o inestable dependiendo de la diferencia térmica entre una masa de aire que asciende y el entorno que la rodea.

En las ciencias naturales de meteorología de España, se explica el concepto cuando el sol calienta el suelo. El sol al calentar el suelo hace que se caliente el aire sobre la superficie debido a la ecuación de gases ideales que la componen, haciendo el aire un mal portador de calor en capaz de viento más altas. Al calentarse el aire, pierde densidad y asciende, se enfría a razón de 9.8°C por kilómetro. Esa masa de aire que asciende lo seguirá haciendo mientras el resto del aire que la rodea se encuentre más frío; su temperatura tiene que ser mayor que la del aire que le

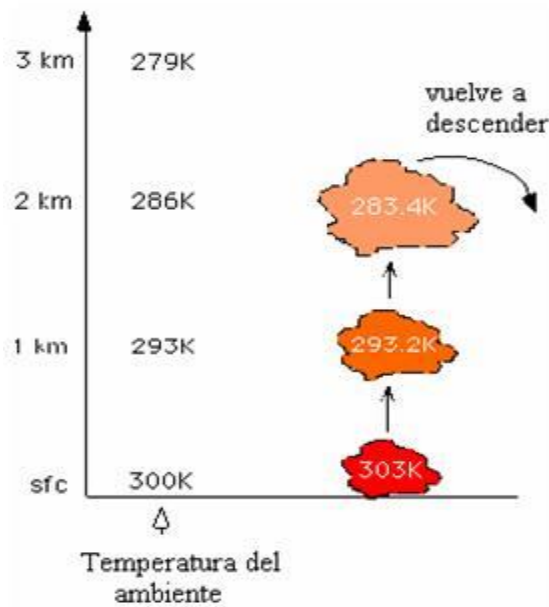
rodea. Si eso es así, será menos densa y tendrá lo que se dice flotabilidad positiva y seguirá ascendiendo. Se dice que la atmósfera es inestable (Meteomóstoles, 2012).



**Ilustración 4. Inestabilidad atmosférica**

Fuente: (Meteomóstoles, 2012)

Cuando la masa de aire, aún con su enfriamiento de 9.8°C por kilómetro, se encuentra en un entorno más frío entonces dejará de ascender por su densidad mayor al entorno y descenderá. En este caso se dice que la atmósfera está estable.



**Ilustración 5. Estabilidad atmosférica**

Fuente: (Meteomóstoles, 2012)

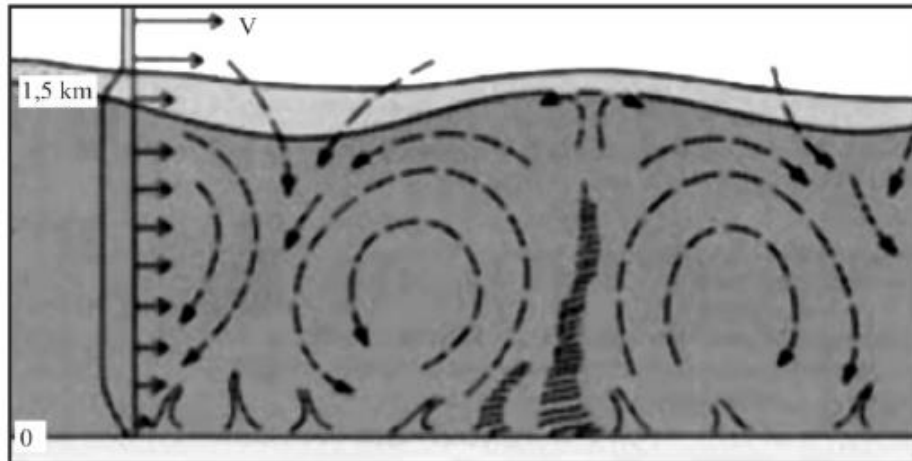
Si la masa de aire se desplaza hacia arriba adiabáticamente (no intercambia su temperatura con el entorno) comúnmente volverá a descender si la atmósfera es estable, se difiere a un desplazamiento de masa de aire isotérmica cuando su temperatura sea constante y su densidad será proporcional a esa constante. Cuando la masa de aire permanece a cierta altura (debido a su característica isotérmica) se determina que la atmósfera está neutralmente estable. En una atmósfera inestable continuará desplazándose hacia arriba. Habrá una capa donde la inestabilidad será tan grande que, al haber tanta incidencia de viento sin ningún patrón, los gradientes de magnitud de viento serán menores y el aprovechamiento eólico será menor o casi nulo.



**Ilustración 6. Perfil vertical en atmósfera estable**

Fuente: (Brizuela & Aguirre, 2004)





**Ilustración 7. Perfil vertical en atmósfera inestable**

Fuente: (Brizuela & Aguirre, 2004)

La variación en magnitud del recurso eólico puede calcularse con una expresión logarítmica de Hellman que dependerá de la atmósfera si está estable o inestable y se expresa:

$$U_{(z)} = \left( U^* / \alpha \right) \times \left[ \ln \left( Z / Z_o \right) + \left( Z / L_s \right) \right]$$

*Ecuación 1. Variación del viento*

Donde  $U_{(z)}$  es la velocidad del viento con respecto a su altura,  $U^*$  es la velocidad de rozamiento que será en función de la tensión superficial.  $\alpha$  es el coeficiente de fricción de Von Kármán que dependerá del lugar de emplazamiento,  $Z_o$  es la rugosidad de superficie y  $L_s$  es la longitud de Monin-Obukhov. Los coeficientes se definen según el terreno, de la siguiente manera:

**Tabla 1. Coeficientes de fricción**

Tipo de terreno	Coficiente ( $\alpha$ )
Lagos, playas, cuerpos de agua	0.10
Campo cubierto de hierba	0.15
Cultivos altos	0.20
Tierra boscosa	0.25
Ciudad pequeña con árboles	0.30
Ciudad urbana	0.40

Fuente: (Gonzales, 2019)

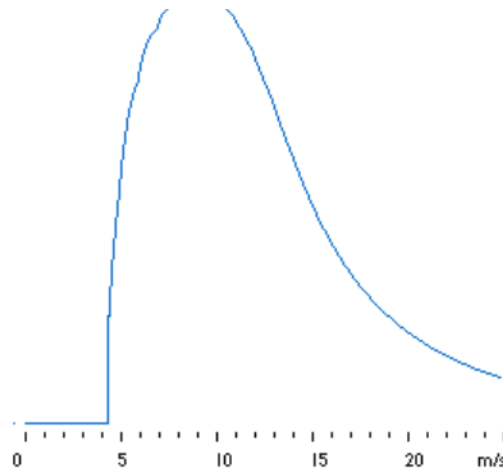
Dado que la velocidad de rozamiento ( $U^*$ ) requiere equipo específico y difícil de calcular, se reescribe la fórmula de variación como:

$$U(z) = U(z_0) \times \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha$$

*Ecuación 2. Variación del viento simplificada*

### 3.2.4 COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia es la representación de eficiencia en un aerogenerador; es decir, determina la eficiencia con la que una turbina eólica genera energía eléctrica a partir de la energía del viento. Una mayor eficiencia técnica en un aerogenerador no representa una mayor virtud o ventaja sobre otras turbinas de menor eficiencia debido a que lo que se espera del aprovechamiento del recurso eólico a energía eléctrica es un bajo costo por producir los kWh. Las optimizaciones de las turbinas no se hacen en función de su eficiencia mayor, debido a que el costo puede aumentar deliberadamente. La construcción de las turbinas eólicas es robusta y pesada, con la finalidad que funcionen a bajas velocidades y puedan producir energía de manera constante a lo largo del año, es por ello por lo que una turbina eólica resulta ser muy ineficiente a grandes velocidades después del efecto rodilla en la curva de potencia de cada una. Construir una turbina eólica muy eficiente resultará muy caro y le reduce la viabilidad técnica a un proyecto. Un rendimiento de coeficiente de potencia común es el siguiente:



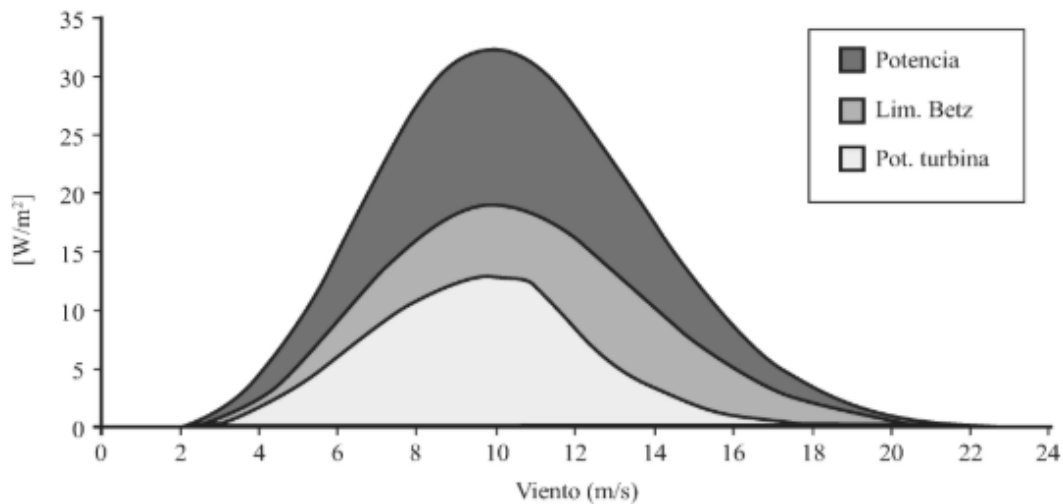
**Ilustración 8. Coeficiente de potencia**

Fuente: (*El Coeficiente de Potencia*, 2020)

### 3.3 CONCEPTO EÓLICO

La tecnología convencional eólica captará la energía cinética del viento conforme al área de barrido que contengan la longitud de sus palas, el viento tendrá una magnitud y dirección específica de la cual se aprovechará el recurso para mover un eje y este al pasar por un sistema de engranajes para multiplicar la velocidad de rotación en otro eje, por medio de un generador se convertirá la energía mecánica a energía eléctrica. El aprovechamiento del recurso eólico dependerá de ciertas medidas; el límite de Betz, el número de Reynolds, el efecto Estela y la densidad del viento.

El potencial de energía que contenga un recurso eólico en un instante de segundo, conocido como la potencia teórica, varía proporcionalmente al cubo de la velocidad del viento y proporcionalmente a la densidad del aire (Domínguez, 2020).



**Ilustración 9. Potencia teórica, Límite Betz, Potencia turbina**

Fuente: (Talayero & Martínez, 2020)

El potencial de cada magnitud de viento puede ser utilizado para calcular la energía aprovechable del recurso eólico. Multiplicando cada instante de potencia en una magnitud específica de viento por la probabilidad de incidencia de esa misma magnitud en la distribución de Weibull, se obtiene la densidad de potencia; la energía eólica en cualquier magnitud de viento.

Ambas curvas de distribución de Weibull no tienen simetría entre ellas, esto es debido a que, si bien es cierto que las ráfagas de viento de gran magnitud son bien raras en el intervalo de un año, la densidad de potencia será mayor. Se puede observar que el mayor potencial de energía eólica se encuentra en vientos de magnitud mayores al promedio, entre 9-12 m/s. Por esa razón, los aerogeneradores convencionales alcanzan el efecto rodilla a 12 m/s; el mayor rendimiento para generar energía eléctrica. Aunque el recurso sea el idóneo, los aerogeneradores tendrán sus limitantes por recurso y tecnología.

### 3.3.1 LÍMITE DE BETZ

La cantidad de energía aprovechable desde el recurso eólico para un aerogenerador o cualquier turbina jamás podrá superar un límite basado en la ley de la física llamado el límite de Betz. Este permite aprovechar un 59.3% de la energía cinética del viento total ya que es imposible frenar por completo el flujo de viento en las aspas ya que las aspas en cierta manera solo desvían el flujo del viento por fuera de su área de barrido (Gonzales, 2019) . Sin embargo, en campo nunca supera el 40%. La demostración de esta ley dependerá de ciertos factores como la densidad del viento, el flujo de masa de corriente instantánea, al área de barrido y las velocidades del viento antes y después de pasar al área de barrido. La masa de corriente de aire a través del rotor es:

$$m = \rho \times F \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right)$$

*Ecuación 3. Masa de corriente*

Donde  $\rho$  es la densidad del viento,  $F$  es el área de barrido y el cociente entre la suma de velocidades de viento antes y después del área de barrido es la velocidad promedio. La potencia aprovechable se expresará de la siguiente manera:

$$P = \left( \frac{1}{2} \right) m (v_1^2 + v_2^2)$$

*Ecuación 4. Potencia del viento*

Reemplazando la primera ecuación en la segunda (redefiniendo la masa de corriente) se obtiene la potencia de salida; la extraída del viento y se expresa de la siguiente manera:

$$P = \left(\frac{\rho}{4}\right)(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)F$$

*Ecuación 5. Potencia extraída del viento*

Para desarrollar demostrar el límite de Betz en base a las potencias antes y después del rotor, se expresa ahora la ecuación para calcular la potencia en la misma área de barrido antes de pasar el rotor y no empiece a perturbarse las direcciones y magnitudes de viento, Po:

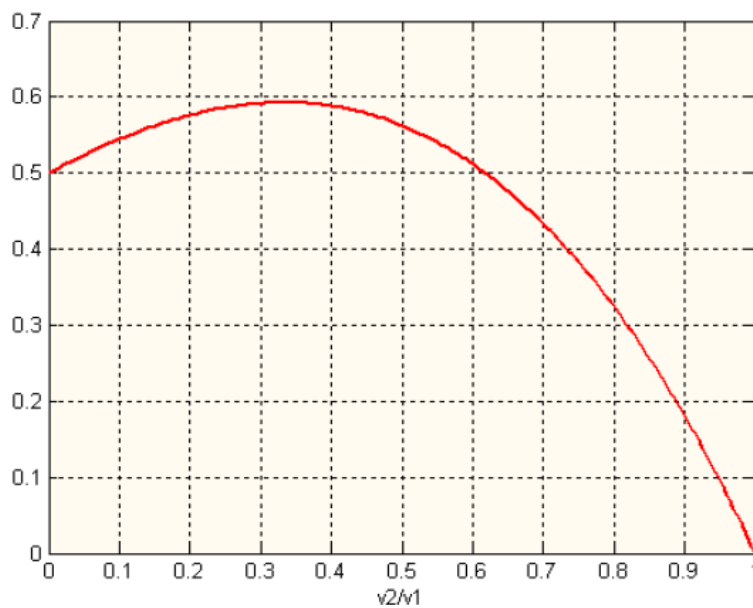
$$P_0 = \left(\frac{\rho}{2}\right) v_1^3 \times F$$

*Ecuación 6. Potencia antes de ser extraída*

La ratio entre la potencia extraída y la potencia antes de pasar el rotor servirá para generar la función de la potencia con respecto a la ratio de la velocidad final e inicial y se calcula con la siguiente expresión final:

$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \right]$$

*Ecuación 7. Ratio de potencias*



**Ilustración 10. Límite de Betz**

Fuente: (Ornelas, 2008)

### 3.3.2 NÚMERO DE REYNOLDS

La capacidad de aprovechamiento del recurso eólico dentro del límite de Betz dependerá del número de Reynolds del fluido (viento). El número de Reynolds en el concepto eólico es un número adimensional que relaciona las características de viscosidad e inercia de un fluido sometido en una estructura o cuerpo sumergido en el mismo fluido. Cuando el flujo encuentra una superficie sólida, la capa límite comienza a desarrollarse. Avanzando en la dirección de la corriente, más fluido se ralentiza y, por lo tanto, el grosor de la capa límite crece (Naveira & José, 2019) y se expresa de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

*Ecuación 8. Número de Reynolds*

Donde  $\rho$  es la densidad del flujo,  $U$  es la velocidad del flujo libre o la referencia del flujo lejos de la capa límite (boundary layer),  $L$  es la distancia de referencia  $\mu$  es la viscosidad cinética.

El número de Reynolds se puede caracterizar de dos maneras básicas, un flujo laminar y uno turbulento. El tipo de flujo dependiendo del número de Reynolds que contenga, tendrá una reacción específica en la capa límite de una estructura sumergido o en el paso del fluido. La capa límite, explicado desde la mecánica de un fluido, es el punto o capa donde el fluido se perturba o pierde su patrón al chocar con una superficie; puede coexistir en esa capa límite flujos laminares y turbulentos. Si el número de Reynolds es menor a 2300, el flujo será laminar y, si es mayor de 4000, el flujo será turbulento.

### 3.3.3 PERFILES DE BAJO NÚMERO DE REYNOLDS

Un fluido con un bajo número de Reynolds ( $Re \leq 2,300$ ) es el recurso eólico más idóneo para la tecnología de conversión convencional en un aerogenerador, dado que el fluido será laminar y el efecto estela que pueda generar este fluido después será reducido. Un bajo número de Reynolds reducirá el grado de vórtices que se generen cuando el fluido pasa después del cuerpo o estructura, esto a su vez, tendrá una repercusión en la generación burbujas de

separación laminar, comúnmente conocida como *dead-air region*. Burbuja de circulación es un espacio donde se crea un flujo de recirculación del viento; vórtices. El grado de área que ocupará esta región dependerá del número de Reynolds y del perfil de la estructura, entre más grande sea esa burbuja mayor deformidad habrá en el fluido. (Cremades Botella, 2019)

La recirculación dentro de la burbuja del aire generará un patrón de vórtices alrededor del aerogenerador que podrá o no condicionar aún más el efecto de inercia en cuanto al efecto estela. Por esta razón, se consideran en el emplazamiento convencional de aerogeneradores distancias muy grandes entre cada aerogenerador; 2 veces el diámetro del área de barrida entre aerogeneradores de la misma fila y entre 3-5 veces el diámetro del área de barrida entre filas de aerogeneradores.

Los conceptos de las limitantes tecnológicas que existen en la tecnología convencional de aerogeneradores son las bases para estudiar y explorar un nuevo concepto eólico, que buscará en cierta medida mitigar o reducir las limitantes, y en algunos casos, revertir los limitantes por ventajas de esos mismos conceptos en la nueva tecnología de conversión.

### **3.4 FUNDAMENTOS PARA UN NUEVO CONCEPTO**

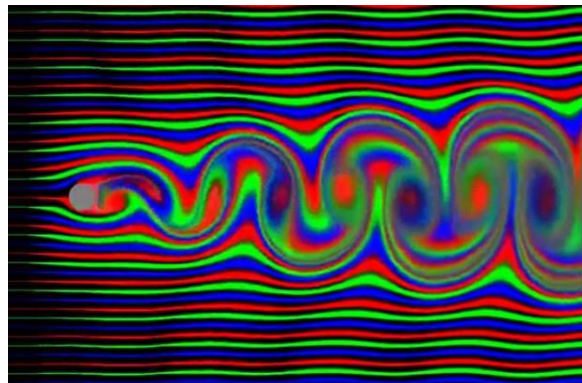
Un nuevo concepto de energía eólica se formó a partir del colapso de un puente en Estados Unidos en 1940; el puente Tacoma Narrow. El puente había sido creado con la finalidad de interconectar dos caminos para un tránsito más eficiente en medio de una brecha por el paso de un río, sin saber que 70 años después su finalidad iba a ser el estudio de ciencias aeroelásticas en estructuras. Comúnmente se conocía a la aeroelasticidad como un problema procedente de un fluido en una estructura, ahora ese concepto ha cambiado y es usado para la generación de energía. El desastre sirvió para estudiar más a fondo conceptos como aeroelasticidad, la resonancia entre dos o más frecuencias, deformidad del viento en vórtices, entre otros menores apegados siempre a ilustraciones de simulación de fluidos (CFD).

### 3.4.1 AEROELASTICIDAD

"La aeroelasticidad es la ciencia que se enfoca en el estudio de fuerzas aeroelásticas (fluido) y movimientos de la estructura sumergida en el fluido" (Billiah, 1991). Las fuerzas aeroelásticas son las acciones que se producen por el viento en una estructura que se está deformando por la incidencia de viento. Estas fuerzas aeroelásticas producen una inestabilidad aeroelástica que se describe como un fenómeno de movimientos en una estructura sin control producidas por estas fuerzas. Estas fuerzas son semejantes a las fuerzas aerodinámicas con la diferencia que las aerodinámicas consideran la geometría de la estructura antes de ser deformadas. Este concepto servirá para explicar el fenómeno de resonancia que fue la culpable del desastre del puente.

### 3.4.2 RESONANCIA

El fenómeno de resonancia se entiende como una fuerza de oscilación debido a un movimiento constante por un patrón definido de viento. La resonancia emerge cuando dos frecuencias son semejantes; una estructura tendrá una frecuencia de oscilación natural que será movida o deformada por otra fuerza que sería una aeroelástica. La oscilación o deformidad se producirá exactamente cuando la frecuencia del cuerpo sea semejante a los vórtices que generará el efecto estela del viento después de pasar la estructura, este concepto de vórtices es del teorema de Von Kármán. La resonancia de oscilación, de la mano del teorema de Van Kármán, es la forma ideal para aprovechar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica. A su vez, esta energía mecánica servirá para ser aprovechada en convertirla en energía eléctrica.



**Ilustración 11. Patrón de vórtices obtenido por CFD**

Fuente: (Yáñez, 2015)

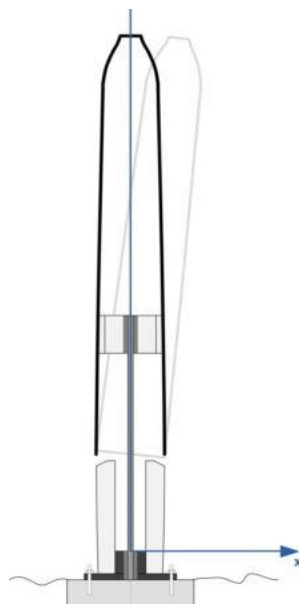


### 3.4.3 VÓRTICES DE VON KÁRMÁN

El fenómeno de calle de vórtices de Von Kármán es el que se produce en la estela del fluido pasando la estructura. Una vez hayan entrado en resonancia ambas frecuencias y empiece a oscilar, estos vórtices aparecerán con un patrón definido (considerando un flujo de viento constante). Hay dos principales fuerzas que interactúan en este concepto, la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre. La fuerza de sustentación se produce en dirección perpendicular al viento dependerá de la frecuencia de aeroelasticidad. La fuerza de arrastre va en paralelo con la dirección del viento y generará una torsión dependiendo del número de Reynolds; será constante cuando el flujo sea laminar y estacionario ( $2,300 < Re < 3,000$ ).

### 3.5 AEROGENERADOR VORTEX BLADELESS

Los aerogeneradores Vortex tienen la principal característica en su estructura; un aerogenerador vertical sin palas ni engranajes. Con los conceptos antes descritos, Vortex utiliza estos fenómenos de fluidos para aprovechar la resonancia entre la frecuencia de la fuerza aeroelástica y la frecuencia natural del aerogenerador que, a su vez, generarán un patrón marcado de vórtices alrededor de la estructura.



**Ilustración 12. Vortex Bladeless**

Fuente: (Vortex, 2020a)

Básicamente, Vortex consiste en un cilindro vertical que está fijado al suelo con una pletina atornillada en una superficie dura como hormigón, hierro, piedra o acero. El cilindro oscilará dentro de un rango físicamente seguro para la estructura, el ángulo de oscilación con respecto a la referencia perpendicular al suelo será la suficiente para mecanizar la energía cinética sin producir roturas por estrés o fatiga en el mástil.

### 3.5.1 GEOMETRÍA DE ESTRUCTURA

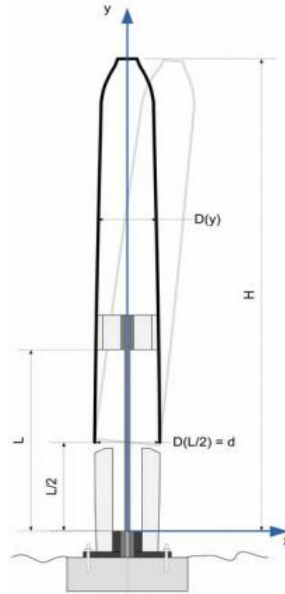
La dirección del viento siempre será (en condiciones normales) variada, especialmente en zonas urbanas donde la rugosidad y la cantidad de obstáculos será mayor y acondicionarán la magnitud y dirección del viento. Bajo ese hecho, Vortex busca una geometría capaz de adaptarse simultáneamente a los cambios de dirección del viento. Se difiere a la tecnología solar FV que utiliza mecanismos de engranajes para tener un seguimiento a la radiación solar óptima (radiación perpendicular al plano horizontal del módulo), ya que el polígono utilizado para su geometría es un círculo, un polígono de infinitos ángulos, que le dará la facilidad de oscilar a cualquier dirección en cuanto entre en resonancia con el viento más incidente en ese instante de tiempo o intervalo.

Al elegir una sección transversal circular, el siguiente paso es definir la estructura geométrica vertical. La captación cinética del viento deberá de ser congruente bajo alguna fórmula sobre toda la estructura, con la finalidad de evitar generar vórtices que choquen entre sí que puedan reducir el rendimiento del Vortex. La sincronía de la estructura con el desprendimiento de vórtices a lo largo del mástil dependerá de su diámetro en función de su altura. La fórmula que caracteriza el aprovechamiento de las fuerzas del viento se define bajo el siguiente concepto:

$$\Phi = D + a \cdot X$$

*Ecuación 9. Sincronía entre vórtices y el mástil*

Donde  $\Phi$  es la dimensión característica de una estructura cilíndrica estática, pero el Vortex al ser una estructura que oscilará, deberá de considerar la suma del diámetro del mástil, la amplitud de oscilación ( $X$ ) multiplicada por un factor de ajuste ( $a$ ) que dependerá del número de Reynolds.



**Ilustración 13. Esquema de estructura geométrica**

Fuente: (Yáñez, 2015)

### **3.5.2 COMPONENTES DE ESTRUCTURA**

La estructura en general se puede dividir en 2 partes; mástil y base. Sin embargo, el dispositivo Vortex se divide en 3 secciones; mástil, sistema de sintonizado (alternador) y varilla de base. El mástil requiere un peso muy bajo ya que este le permitirá oscilar con mayor facilidad con la incidencia del viento, actualmente se usan fibras de carbono o vidrio para esta parte del equipo debido a su buen rendimiento, sin embargo, se espera que el grafeno (fibra de carbono estructurada) sea el material por utilizar. El sistema de sintonizado que transformará la energía mecánica (oscilación) en energía eléctrica por medio de un alternador se encuentra en el núcleo de la estructura. Abajo del núcleo está la varilla que le dará la firmeza a la base para estar fija en el hormigón. Todos los componentes del equipo son de materiales como fibra de carbono (grafeno), fibra de vidrio, plástico y los metales piezo eléctricos en el sistema de sintonizado.

### 3.5.3 CONVERSIÓN DE ENERGÍA

Vortex captando la energía cinética del viento para mecanizar la estructura por medio de la oscilación, tendrá un sistema de sintonizado por medio de un alternador magnetizado para convertir esa energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna. Este sistema elimina la necesidad de engranajes, ejes o deslizamientos para la generación de energía haciéndolo más fácil y de costo de mantenimiento prácticamente nulo. El sistema de sintonizado requiere la incorporación de dos pares de imanes oponiendo las caras del mismo polo. Por cada par, un imán se implementará en la parte fija de la estructura y el otro en la parte que oscila. Al momento de oscilar, estos dos pares de imanes se repelerán creando una fuerza magnética inversamente proporcional a la distancia entre cada imán del mismo par.

Entre mayor sea la oscilación, más se acercarán los imanes y con mayor fuerza se repelerán. A mayor velocidad de viento, mayor amplitud de oscilación, manteniéndose la resonancia acoplada sólo en un rango concreto y calibrable. Estos dispositivos contienen un mecanismo de micro-inversor para convertir la corriente generada del alternador (AC) a corriente directa para que se almacene en un acumulador. La energía acumulada podrá ser utilizada por medio de un puerto USB Tipo A hembra, puerto comúnmente utilizado para cargar aparatos como celulares ya que la salida de esta conversión electrónica es de 5V DC.

La fórmula de conversión de energía desde una turbina eólica siempre será la misma independientemente su tecnología y característica. La fórmula de potencia del viento será:

$$P = \frac{1}{2} A \rho V^3$$

*Ecuación 10. Potencia del viento*

Dado que el área de barrido (A) de un aerogenerador convencional es 360° por sus palas, Vortex no tiene un área de barrido definido, este varía según la amplitud de oscilación que puede llegar actualmente a 4.5° a cada lado con respecto a la vertical. El cálculo del área para Vortex será distinto y se presenta de la siguiente manera considerando que los ángulos se deben calcular en radianes:

$$A = 2 \times \left( \frac{4.5}{360} \right) \times L$$

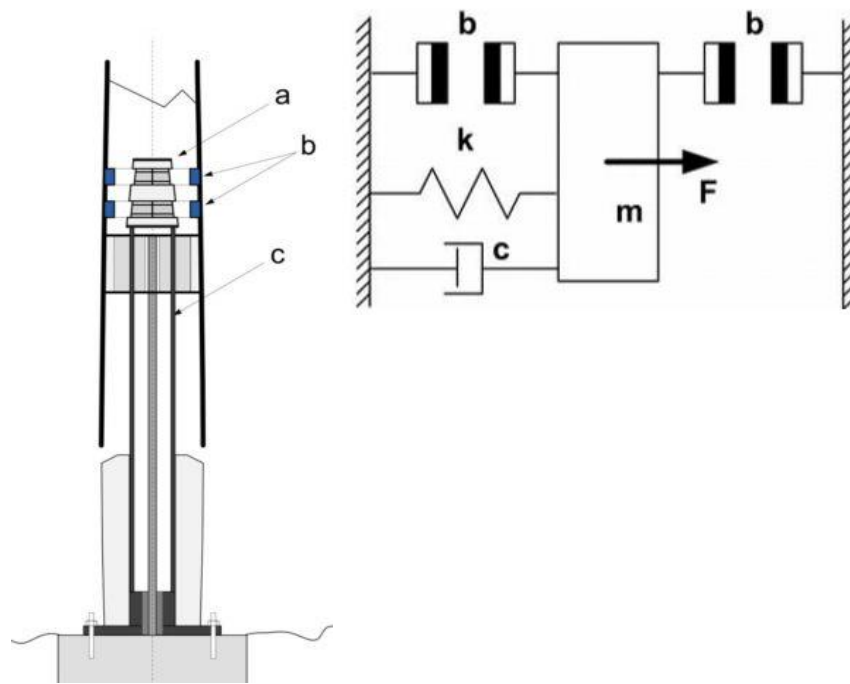
*Ecuación 11. Área de barrido Vortex NANO*

Donde L representa la longitud del mástil que se asemeja a la longitud de una pala y el mismo cálculo de la circunferencia en radianes. Se realiza el cociente debido a que Vortex es una pequeña parte del área de barrido de la convencional y como su amplitud varía dependiendo el sistema de sintonizado, el cálculo de la frecuencia de amplitud es la siguiente a utilizar en los siguientes tipos de aerogeneradores Vortex:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k + k')}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$

*Ecuación 12. Frecuencia de amplitud de oscilación*

Donde k es la constante de elasticidad por material que oscila, k' es la parte elástica por la repulsión de los imanes, m la masa del mástil y c el amortiguamiento dado por la rigidez de la varilla de fibra de carbono que sustenta el alternador.



**Ilustración 14. Esquema de sintonizado**

Fuente: (Vortex, 2020b)

### 3.5.4 MANTENIMIENTO

Al no contar con un sistema de engranajes y no presentan o requieren partes mecánicas que puedan desgastarse con facilidad como en la tecnología convencional, la vida útil de los Vortex Bladeless es mayor. El aerogenerador Vortex no es eximido de estrés y fatiga. La fatiga en este dispositivo tiene que ver con la oscilación, un debilitamiento constante al material o parte que se está moviendo; el mástil. Los materiales más usados son las fibras de carbono/vidrio y la varilla de fibra de carbono en su base es diseñada para permitir un rango de amplitud no mayor a 2.7° con respecto a la vertical de la estructura. Esta varilla estará expuesta a una fuerza de torsión constante insinuando posibles fallos en el material por fatiga. *“El análisis computacional y matemático realizado en relación con el componente más afectado por este fenómeno de fatiga nos hace pensar que el aerogenerador Vortex tiene una esperanza de vida de 20 años.”* (Yáñez, 2018).

### 3.5.5 IMPACTO AMBIENTAL

El diseño simple de estos aerogeneradores, permiten hacer un uso más eficiente de materia prima. Evitando procesos de fabricación complejos para construir un aerogenerador sin palas. La ausencia de lubricación por no usar engranajes hace innecesaria la presencia de operadores en este sector de mantenimiento. La muerte de aves se eliminaría por completo debido a que el área del rotor no existe como una de tipo convencional. El diseño de Vortex permite que el movimiento oscilatorio sea pequeño y menos agresivo que el rotatorio de turbinas tradicionales, por lo que no perturbará a las aves que detecten y eviten fácilmente los Vortex mientras vuelan.

El impacto que tienen las convencionales de ruido y sombras también se eliminan ya que esta no presenta cortes de viento con aspas y la sombra es fija; no la sombra rotativa y mareante que generan las aspas. En cuanto al emplazamiento, la distancia mínima requerida entre dispositivos es de la mitad de su altura. Esto logra una mayor densidad de dispositivos por m<sup>2</sup>, ya que el efecto estela no representa un problema significativo a esa distancia mínima.

### **3.5.6 EMPLAZAMIENTO**

Vortex Bladeless logra una mayor densidad de dispositivos por  $m^2$ , ya que no busca evitar el efecto estela que generará el viento por medio del patrón de vórtices pasando la estructura. Al tener una mayor densidad de dispositivos por  $m^2$  se determina una mayor densidad de potencia por unidades instaladas. Las tecnologías convencionales de aerogeneradores de eje horizontal deberán considerar espacios de 2 veces el diámetro del área de barrido entre aerogeneradores de la misma fila y de 3-5 veces el diámetro del área de barrido entre filas de aerogeneradores. Mientras que la tecnología Vortex solo requiere un espacio de la mitad de su altura entre dispositivos entre filas o de la misma fila. Teniendo un emplazamiento con una densidad mucho mayor que de la tecnología convencional, para proyectos o instalaciones la potencia instalada podrá ser suficiente para cubrir algún porcentaje de demanda considerable que dependerá de la altura del propio Vortex; un emplazamiento de Vortex Tacoma será en potencia instalada mucho mayor a un emplazamiento realizado para la tecnología Vortex NANO. Esto se debe a la propia utilidad del Vortex NANO que es para carácter de estudio y análisis.

### **3.5.7 VORTEX NANO**

El prototipo Vortex Nano es un preserie de Vortex Bladeless de 0.85 metros de altura y un peso aproximado de 2.5 kg. Diseñado para densidades de potencia muy bajas con la finalidad de experimentar los prototipos para sacar conclusiones que conlleven a un diseño de serie ya apto para su comercialización oficial. Vortex Nano cumple con todas las características y teorías de sustentación generales de Vortex con la diferencia que, dada su altura y su densidad de potencia baja, Vortex NANO destaca por ser un dispositivo para conocimiento teórico y práctico de la tecnología. La imagen del dispositivo se encuentra en la sección de anexos (3).

### **3.5.8 TEORÍAS DE SUSTENTO**

Las fuerzas aerodinámicas e inerciales en el viento tendrán una frecuencia natural y la estructura tendrá su frecuencia natural. Cuando ambas coincidan o se asemejen, se crean los vórtices en su estela y es cuando se reconoce la resonancia de ambas frecuencias. Esta resonancia permite que Vortex empiece a oscilar aprovechando el patrón de vórtices en su estela. Una vez

ambas frecuencias entran en resonancia, el sintonizado del alternador empieza a trabajar. El alternador utilizado es del mismo concepto que cualquier alternador, sin embargo, su función no es de hacer rotar un eje. El alternador consta de un estator embobinado cuyos magnetos de neodimio estarán en su parte externa que a su vez estarán posicionados de cara al mismo polo por otro par de anillos de magneto dentro del mástil. Esto permite que, al oscilar el dispositivo, estas caras del mismo polo se acerquen tanto que habrá una fuerza de repulsión que se asemeja a un resorte para darle más amplitud a la frecuencia de oscilación. Esto es de gran utilidad debido a que Vortex no cuenta con engranajes ni ejes (rotor del estator).

Todas las tecnologías de conversión, exceptuando las solares, generan energía haciendo rotar un eje (conductor) en un estator; la variación de magnetismo genera la electricidad final. Sin embargo, Vortex hace lo contrario, el conductor (embobinado) está fijo cubierto de los imanes con caras positivas hacia afuera que se repelen con las caras positivas en el imán del mástil simulando que los magnetos (estator) se mueve generando al final electricidad en AC que a su vez es rectificadas en una PCB para que su salida sea en DC y pueda ser almacenada o directamente usada por carga DC.



## **IV. METODOLOGÍA**

El capítulo de metodología ayuda a explicar los procesos y enfoques a seguir utilizados para realizar el desarrollo de la investigación atacando la problemática expuesta. En este capítulo se detallarán las técnicas utilizadas, los instrumentos necesitados y la recolección de datos para crear tabulaciones que permitan explicar las variables del proyecto.

### **4.1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

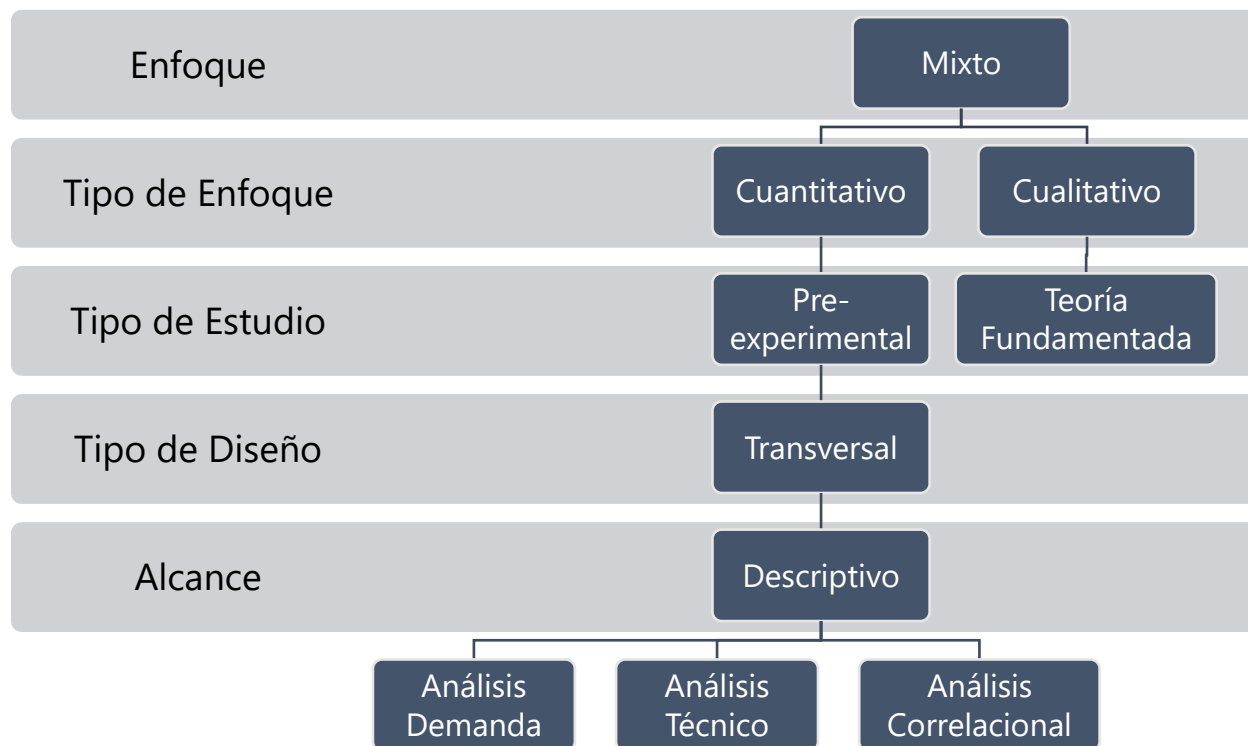
El diseño de la investigación tendrá un alcance y un proceso definido. El alcance resulta o se define desde la revisión de la literatura porque se obtiene una perspectiva más clara de cómo se llevará y cómo se realizará el proyecto. El proyecto de investigación se acota al estudio del comportamiento de la tecnología analizando sus variables haciendo un análisis de correlación entre la generación del Vortex NANO y el comportamiento de demanda en el sector urbano de Puerto Cortés. El tipo de investigación dado que es un prototipo muy poco estudiado, del cual se tendrá que evaluar a detalle muchas características para poder describir de mejor manera su comportamiento, se determinó que el diseño experimental sería de tipo preexperimental siguiendo las indicaciones de Sampieri (2003).

### **4.2 ENFOQUE**

El tema de investigación considera un enfoque mixto, adaptando los procesos cualitativos y cuantitativos puros para las áreas de investigación. Se escoge este enfoque debido a que a priori se debe realizar un estudio que permita elegir el lugar del sitio conforme al que presente las mejores cualidades. Asimismo, se realizó un análisis numérico en cuanto a la generación de la energía dependiendo de sus variables independientes.

Tal y como se define, Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Sampieri & Collado, 2003).

Dado que la investigación es sobre un prototipo experimental, se escogió este enfoque ya que sirve para una reducción de incertidumbre dado que el prototipo no es comercializado todavía, dar una confirmación de la realidad a una inmediatez en el mercado y consolidar la información obtenida para que se proceda a realizar futuras mejoras.



**Ilustración 15. Esquema de enfoque**

Fuente: Elaboración propia (2020)

### 4.3 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Un pre-requisito de una investigación experimental es la manipulación intencional de una variable independiente, que tendrá una influencia gradual o directa en las demás variables independientes. Al manipular una variable independiente (antecedente), este cambio repercutirá en una variable dependiente (consecuente) y es así como nace un análisis experimental iniciando desde las variables.

#### 4.3.1 MATRIZ METODOLÓGICA

Para presentar una congruencia metodológica entre el planteamiento del problema y la metodología, se realiza una tabla o matriz metodológica. La tabla se crea con las variables de operacionalización; el problema a atacar, los objetivos y variables.

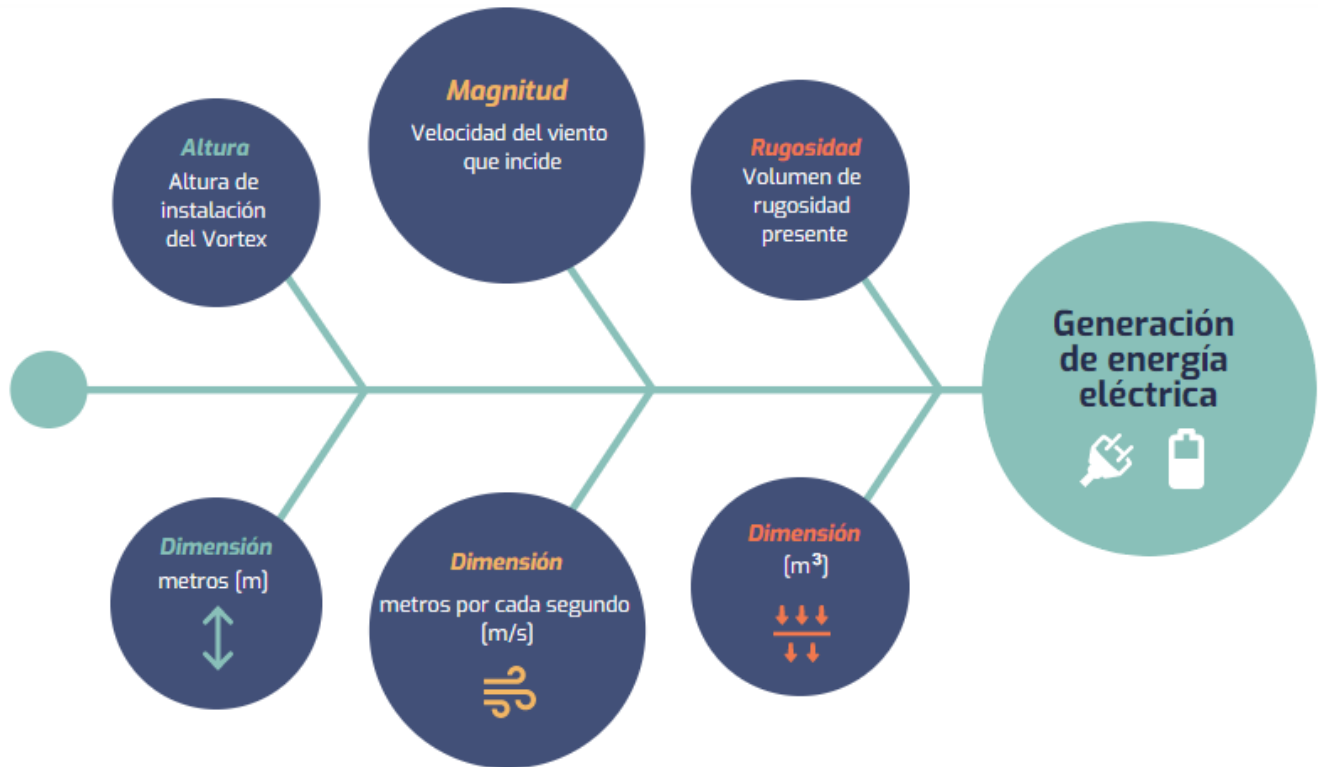
**Tabla 2. Matriz metodológica**

**EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO: ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE VORTEX NANO EN PUERTO CORTÉS, HONDURAS**

<b>Problema</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Preguntas de Investigación</b>	<b>Variables Independientes</b>	<b>Variables Dependientes</b>
Dadas las condiciones deplorables del servicio de la ENEE, los consumidores finales deben generar energía <i>in situ</i> para desligarse en cierto porcentaje del servicio de la ENEE	Hacer un análisis del dispositivo Vortex para poder implementarlo correctamente en zonas urbanas de Puerto Cortés y diversificar el autoconsumo del cliente	Realizar el análisis de generación con y sin obstáculos alrededor del Vortex.	¿Qué diferencia porcentual de generación tendrá Vortex si se presentan obstáculos?	Magnitud del viento	Energía generada por el aerogenerador Vortex
		Elaborar un diagrama de rendimiento de Vortex considerando la generación de energía con respecto a la magnitud del viento incidente.	¿Qué rendimiento tendrá Vortex con respecto a la magnitud del viento?	Rugosidad	
		Determinar que métodos de implementación adicionales pueden ser considerados para implementar Vortex.	¿Qué otras aplicaciones pueden ser recomendadas para utilizar Vortex?	Altura de instalación	

Fuente: Elaboración propia (2020)

La matriz metodológica servirá para que el lector comprenda de manera resumida que se pretende obtener y cómo se obtendrá el resultado final del estudio. Luego de haber identificado las variables, se extiende a crear una ilustración que detalle la operacionalización de las variables e identifique en qué dimensiones se cuantificará o calificar.



**Ilustración 16. Variables de investigación**

Fuente: Elaboración propia (2020)

#### 4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Todas las técnicas e instrumentos aplicados tienen como finalidad facilitar la realización del estudio obteniendo datos e información que serán vitales para la elaboración del proyecto. Las técnicas e instrumentos serán condicionadas por el tipo de enfoque elegido para la investigación, siendo este proyecto mixto, se definieron las técnicas e instrumentos congruentes al enfoque.

##### 4.4.1 TÉCNICAS

La primera técnica utilizada para el proyecto fue una investigación; teorías de sustentación del nuevo concepto eólico y el concepto convencional. Realizando una investigación a fondo, la literatura utilizada y referenciada se basa en tesis universitarias, libros, publicaciones del mismo o

parecido concepto y fuentes confiables de plataformas como Google Académico y ResearchGate; plataformas para el uso exclusivo de publicaciones y estudios científicos publicados.

#### **4.4.2 INSTRUMENTOS**

Al ser un análisis de experimento, se necesitan herramientas o instrumentos que nos permitan definir parámetros para poder comprender o mitigar las variables independientes de la investigación en campo.

##### *4.4.2.1 CAD SolidWorks Versión 2019*

SolidWorks es un programa (software) que permite crear piezas, estructuras, ensamblajes y modelos de figuras en 3D. Este programa es utilizado para crear y renderizar modelo 3D y a su vez, simular comportamientos de fluido sobre el modelo.



**Ilustración 17. Logo del programa SolidWorks**

Fuente: (SolidWorks, 2020)

##### *4.4.2.2 Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*

PVGIS es una plataforma que cuenta con herramientas para calcular radiación solar horaria, diaria, mensual y anual. Asimismo, cuenta con herramientas para cálculo de dimensionamientos solares FV y la última herramienta que es un generador de tabulación de datos meteorológicos de cualquier país o punto exacto.



**Ilustración 18. Logo plataforma PVGIS**

Fuente: (PVGIS, 2020)

#### 4.4.2.3 FreeCAD Versión 0.18

Semejante a CAD SolidWorks, el programa (software) FreeCAD es útil para la creación de estructuras o modelos en 3D para su visualización e ilustración. Es un software gratis a diferencia de SolidWorks que requiere de una licencia ya sea estudiantil o pro. Este programa es comúnmente usado para la empresa Vortex Bladeless, sin embargo, no es utilizado ni es posible para realizar análisis CFD o flujos comunes sobre un cuerpo o estructura.



#### **Ilustración 19. Logo del programa FreeCAD**

Fuente: (FreeCAD, 2020)

## 4.5 MATERIALES

Los materiales utilizados sirven para elaborar un experimento debidamente. Estos equipos permiten al investigador medir, testear, visualizar y tabular información importante para realizar un análisis de datos posteriormente.

### 4.5.1 VORTEX NANO

El prototipo NANO es un aerogenerador de preserie con altura de 0.85 m y un peso de 1.75 kg, utilizado como centro de estudio para poder observar el comportamiento de generación de energía con respecto a las variables independientes. El prototipo podrá variar según las condiciones climatológicas de la zona y/o país. Tiene una salida de potencia en DC de 5V y a una corriente de 3000 mAh, medida que irá mejorando una vez realizando series de modelos más altos con mayor captación de recurso eólico. Imagen del equipo se encuentra en anexos (4).

### 4.5.2 ANEMOMETRO DE BOLSILLO

Un anemómetro de bolsillo que permite medir la magnitud del viento en cualquier unidad [m/s, kph, mph, Kts]. Asimismo, permite medir la temperatura del ambiente en unidades

Fahrenheit y Celsius. Este anemómetro permite medir la velocidad del viento actual, máxima y promedio en intervalos de 5,10 y 13 segundos. Imagen del equipo se encuentra en anexo (5).

#### **4.5.3 ACUMULADOR DE ENERGÍA**

Batería recargable de 6 voltios, 4 Ah en DC. Este equipo es utilizado para almacenar la energía generada de cualquier tipo de generador, comúnmente usada para experimentos de generadores de baja potencia o prototipos. Imagen del equipo se encuentra en anexo (6).

#### **4.5.4 ESTACIÓN METEREOLÓGICA**

Una miniestación meteorológica capaz de medir (por medio de sensores) temperatura y humedad exterior, magnitud de viento con anemómetro e incluye un pluviómetro. Este equipo es capaz de tabular la información calculada en intervalos escogidos y predecir las condiciones climatológicas en un plazo de 24 horas próximas; la precisión mejora con respecto a la cantidad de información tabulada. Imagen del equipo se encuentra en anexo (7).

Incluye un monitor de accesorio a la miniestación meteorológica que muestra en una pantalla portátil toda la información en tiempo real que mide la miniestación. Este monitor incluye sensores de humedad y temperatura que sirven para medir estos niveles para interiores ya que comúnmente el monitor se maneja en oficina o adentro de la vivienda. Las unidades mostradas en el monitor son escogidas y pueden ser recalibradas según el operador como desee, permitiendo un manejo más preciso de datos. Imagen del equipo se encuentra en anexo (8).

### **4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

Se procede a detallar toda la metodología de estudio aplicada al proyecto de investigación desde los análisis de variables hasta el renderizado del modelo 3D.

#### **4.6.1 ANÁLISIS TÉCNICO**

Luego de haber concluido la revisión de literatura se procedió a determinar, adecuado al enfoque elegido, las variables de investigación. Como variables independientes se escogieron la magnitud del viento, la densidad de obstáculos alrededor del Vortex y la altura de la instalación

del prototipo. Después se procedió a determinar la variable dependiente del proyecto que será la energía generada por el prototipo Vortex que dependerá de las variables independientes antes mencionadas y que entre ellas hubo una correlación explicada en análisis y resultados.

#### 4.6.1.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

Considerando el enfoque mixto, se elaboró un análisis cualitativo para poder elegir el mejor lugar para realizar el proyecto de investigación. Se tomó bajo una matriz de decisión midiendo magnitud de viento con el anemómetro SKYMATE para tener una referencia algo precisa de qué lugar tendría mejor recurso eólico.

**Tabla 3. Matriz de decisión  
EVALUACIÓN PARA TOMA DE DECISIÓN DEL LUGAR A ELABORAR EL PROYECTO**

<b>Casa Habitacional a 1.3 km de la Playa Marejada</b>	<b>Lugar</b>	<b>Propiedad a la orilla de la Laguna de Alvarado</b>
3.02	<b>Altura de instalación [m]</b>	3.98
1.77	<b>Promedio de viento [m/s]</b>	1.91
3.9	<b>Máxima registrada [m/s]</b>	5.2
0.0	<b>Mínima registrada [m/s]</b>	0.3
Sí	<b>Acceso a internet</b>	Sí
Considerable	<b>Espacio libre</b>	Sí

Fuente: Elaboración propia (2020)

Con respecto a las variables observadas y analizadas se concluyó que la propiedad a la orilla de la Laguna de Alvarado era el mejor lugar para elaborar el proyecto dada la inmediatez de altura con respecto al suelo explicado en el marco teórico y la incidencia promedio de viento en el lugar.



#### *4.6.1.2 RENDERIZADO DEL MODELO 3D*

El análisis de flujo del viento sobre una estructura para el diseño de un experimento es indispensable para tener de antemano una predicción de comportamiento del prototipo. Antes de instalar el equipo y después de realizar el análisis de ubicación del proyecto, se procedió a crear el modelo CAD 3D en SolidWorks. Siguiendo una cronología de actividades adecuada y ayuda provista por la empresa Vortex en cuanto a medidas del prototipo NANO se obtuvo un modelo renderizado para poder efectuar un análisis de flujo de viento sobre el prototipo NANO. Empezando a modelarlo desde la pletina hacia arriba terminando con el mástil, teniendo como base el modelo de FreeCAD provisto.

#### *4.6.1.3 INSTALACIÓN*

Se procedió a instalar el prototipo Vortex en el lugar escogido, asegurándose de cumplir con las normas y especificaciones del proveedor para cumplir o acercarse a los datos de rendimientos obtenidos en España. Haciendo uso de 5 tornillos ØM4 distribuidos 72° radialmente, se fijó la pletina con el hormigón de la plancha en la galera superior.

Una vez instalado el aerogenerador, se procedió a instalar la miniestación meteorológica para ir actualizando y tabulando los datos meteorológicos para corroborar o corregir los datos obtenidos de PVGIS por medio de la UMA de Puerto Cortés, carta de solicitud se encuentra en anexo (9).

#### *4.6.1.4 CALIBRACIÓN DE EQUIPO*

Se requirió realizar un ajuste entre la conexión del mástil con el soporte de los imanes (Pieza "Osc2). Debido a la rotura presente y dado el material del que está hecho el prototipo, se utilizó acetona pura para ser aplicada como un barnizado sobre la conexión de ambas piezas simulando una soldadura o fundición.

Para obtener datos de generación en AC se procedió a retirar el mástil desajustando los tornillos Allen de ØM4 que lo fijan para poder maniobrar con el alternador. Extendiendo dos líneas adicionales entre el empalme de la salida del alternador y la entrada de la placa PCB del rectificador, se pudo medir con el multímetro la energía generada en AC.

#### **4.6.1.5 MEDICIÓN Y MONITOREO**

Con el Vortex NANO y la miniestación meteorológica instalados, se procede a medir energía generada del aerogenerador y la magnitud del viento registrada en la miniestación. Estas mediciones se realizaron en un intervalo de cada hora durante el día y una medición a las 23:00 hrs y 10:00 hrs del siguiente día para tener un promedio de generación durante las horas de descanso. La medición de energía generada del Vortex se hizo mediante dos formas; calculando la energía generada en AC y almacenada en DC. La energía que genera el alternador es en AC, usando un multímetro se calculó periódicamente el voltaje y corriente de salida del alternador cuando se registraba una incidencia de viento considerable. La energía almacenada se obtuvo desde un acumulador (Samsung 26J ICR18650 de 5V DC y 3,000 mAh) que, mediante una placa electrónica, invierte la corriente del alternador a DC para poder ser almacenada. Esta medición en el acumulado en un intervalo de cada hora, resultó ser la energía generada cada hora.

Después de una semana de medir diariamente incidencias del viento con el anemómetro SKYMATE y la miniestación para contrastar datos con los provistos por la UMA de Puerto Cortés, se procedió a hacer mediciones de intervalos más largos entendiendo de una manera más precisa el comportamiento del recurso eólico; cuando sería suficiente para que Vortex generara energía.

#### **4.6.2 ANÁLISIS DE DEMANDA**

Entendiendo el comportamiento del viento en promedio donde la generación de energía dependerá en principal medida del viento, se procedió a realizar un análisis de demanda de un abonado al servicio de la ENEE. Se realizó una auditoría en una vivienda del circuito L-225 de conexión a la subestación SULZER. A la subestación se conectan los circuitos L-223,224 y 226; zona céntrica de Puerto Cortés y zonas un poco alejadas que abarcan cercanía por todas las costas de la península. Con la auditoría realizada, se crea un gráfico de demanda que determina un comportamiento promedio de cualquier abonado del sector urbano de Puerto Cortés. Este gráfico será útil para realizar un análisis de correlación entre la demanda y el recurso eólico disponible, se podrá incluir en el gráfico la generación del dispositivo Vortex con la desventaja que la magnitud de su comportamiento al ser de potencia baja no se verá reflejada a gran medida.

### **4.6.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN**

Se realizó una comparación entre el comportamiento del viento desde su medición y monitoreo con el comportamiento de la demanda residencial. Mediando un análisis en Excel formulando tabulaciones de recurso eólico y la propia auditoria energética para determinar un análisis de cuándo el Vortex estaría entregando energía y cuando estaría almacenando. Se incluirá un gráfico que permita visualizar la generación actual del Vortex NANO y una proyección de cómo sería con un dispositivo de mayor altura y potencia nominal.

### **4.6.4 ANÁLISIS DE MODIFICACIÓN DE VARIABLES**

Uno de los objetivos y variables a investigar es el comportamiento de energía eléctrica con la presencia de obstáculos alrededor del prototipo. Se procedió a utilizar equipos comunes que puedan estar presentes para obstaculizar el paso del viento hacia el aerogenerador. Se realiza el análisis incorporando obstáculos a nivel del suelo con el aerogenerador en todas las direcciones dado que el prototipo es capaz de generar sin importar la dirección del viento. Luego, se realiza el análisis a una altura de losa de una galera dado que el recurso eólico aumentará sustancialmente y es un caso de implementación más real por su altura de instalación. En este último caso, se procedió a interponer obstáculos que abarcaran menos espacio y variaran en densidad dado el espacio limitado.

### **4.7 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN**

La metodología de validez es indispensable para sustentar el proyecto de investigación a la hora de argumentarlo o exponerlo, dotándolo de información certera y precisa. Para sustentar la validación del informe presente se expresa el uso de las técnicas y herramientas para la realización del proyecto. Las bases para validar esta investigación se expresan en la siguiente tabla de comparación de datos:

**Tabla 4. Validación de datos**

<b>Obtenidos</b>	<b>Campo</b>	<b>Previos</b>
Miniestación ACURITE	<b>Climatología</b>	UMA Pto. Cortés; PVGIS
Mediciones en campo	<b>Energía generada</b>	Mediciones de proveedor
Auditoría energética	<b>Perfil de demanda</b>	Facturación EEH
SolidWorks	<b>Modelo 3D</b>	FreeCAD

Fuente: Elaboración propia (2020)

Los resultados y conclusiones obtenidos al final de la investigación estarán sustentados por esta tabla resumen de validación, donde se corrobora y afinan los datos tanto previos como obtenidos. Tomando en cuenta siempre las limitantes del proyecto que tendrán un grado de imprecisión en ciertas medidas que se mencionarán en la sección de limitantes.

#### **4.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

El cronograma de actividades es el procedimiento por seguir para la investigación del proyecto y la estructura del informe. Se realizó un cronograma para ambas tareas para poder tener un control establecido determinando rutas críticas y mayor holgura para tener un entregable de informe y análisis a tiempo y sin complicaciones.

El cronograma de investigación es el procedimiento explícito para la formulación del experimento y análisis de resultados. Dividido en 4 fases desde la revisión de literatura acerca de la nueva tecnología hasta su instalación en campo y monitoreo de variables. Realizando el cronograma de actividades para el análisis de la investigación del proyecto y siguiéndolo al pie de la letra, se logró presentar el entregable final de la estructura de informe a tiempo.



**Ilustración 20. Cronograma de análisis**

Fuente: Elaboración propia (2020)

## **4.8 LIMITANTES**

Las limitantes del proyecto de investigación indican como se delimitó el alcance de la investigación y el porqué. Las limitantes tendrán un grado de influencia desde la revisión de literatura hasta el entregable final del proyecto dado que acotó el alcance de la investigación. Todas las limitantes se enlistan de manera individual:

### **4.8.1 UBICACIÓN DE ESTUDIO**

Dada la situación sanitaria actual en Honduras, la extensión en campos de estudio se delimitó a 2 casos potenciales por medidas de confinamiento, partiendo de esta limitante se procedió a evaluar el lugar de mejor recurso eólico entre ambos. Teniendo como consecuencia la restricción de evaluar el recurso eólico en San Pedro Sula con el prototipo.

### **4.8.2 TÉCNICAS DE MEDICIÓN**

Debido al cierre de la institución UNITEC por medidas de bioseguridad y confinamiento, el material y las técnicas para realizar mediciones se limitó a equipos básicos de ferretería y electrónicas. Teniendo como consecuencia un estudio experimental limitado y una extensión de análisis de variables reducido por no poder acceder a equipo de laboratorio y apoyo calificado.

### **4.8.4 DAÑO DE EQUIPO**

El prototipo en las aduanas de Puerto Cortés debido al mal manejo del equipo para movilizarlo resultó ser dañado en el mástil, una rotura entre el mástil y la pieza "Osc2". Contactando al proveedor, se formuló el plan para su debida reparación con la consideración que probablemente el equipo no resulte quedar bien mecanizado como nuevo resultando en una baja de rendimiento.

### **4.8.5 ACCESO A INFORMACIÓN**

Se dificulta dada la situación sanitaria presente obtener información que dote de mayor validez a los resultados obtenidos como acceso a una estación meteorológica cercana al campo de estudio, la obtención de materiales y equipo para realizar el análisis del prototipo en campo.

## V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se expondrán las teorías de sustentación aplicadas en el aerogenerador como un proceso lineal. Además, se presentan los resultados obtenidos sobre mediciones y variación de las variables independientes en el experimento para determinar las conclusiones.

### 5.1 ANÁLISIS DE VORTEX

Previamente en el marco teórico se definieron los conceptos o teorías de sustentación que interactúan para la funcionalidad de un aerogenerador Vortex. Para conocer como es el proceso desde el potencial eólico hasta la generación de energía, se procede a explicar el análisis de la tecnología del prototipo.

#### 5.1.1 COMPONENTES

El dispositivo Vortex se divide en 3 piezas fundamentales: mástil, alternador y base y se definen de la siguiente manera:

- **Mástil:** Hecho de material reciclado; tereftalato de polietileno (PET). Es la parte superior del dispositivo, un tubo cuya altura condicionará el diámetro del dispositivo en función de la mitad de su altura. El mástil recolecta la energía cinética del viento y a su vez la mecaniza para que ingrese al sintonizado del alternador.
- **Alternador:** Hecho con neodimio y cubierto por piezas de policarbonato y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Es la parte media del dispositivo donde se encuentra el sintonizado del equipo entre estator, magnetos y el embobinado.
- **Base:** Con su soporte fijo y el faldón que cubre la varilla de fibra de carbono, están hechos de policarbonato son una pletina de acero SS275 que es la pieza que permite que el Vortex se empotre a la superficie utilizando tornillos no menores a M4.

Todos los materiales utilizados son de plásticos reutilizados que tendrán un peso muy bajo y una resistencia a la fatiga por deformidad muy elevada. La pieza más débil del dispositivo se encuentra entre el mástil y el alternador; una pieza impresa 3D que soporta el mástil y le da la flexibilidad para oscilar.

## 5.2 ANÁLISIS DE DEMANDA

Se realizó un análisis básico de la demanda en el sector residencial de Puerto Cortés con la intención de comparar el comportamiento de demanda con el comportamiento de la energía generada por el Vortex NANO.

### 5.2.1 CONSUMO HISTÓRICO

Partiendo de una auditoria en realizada en el consumo de un abonado cerca de la instalación se tabularon los siguientes datos:

**Tabla 5. Consumo Histórico**

<b>Mes</b>	<b>Consumo [kWh]</b>	<b>Tarifa [\$/kWh]</b>	<b>Consumo [\$/]</b>
<b>Enero 2019</b>	510	0.1922	114.63
<b>Febrero</b>	567	0.1922	127.44
<b>Marzo</b>	588	0.1922	127.87
<b>Abril</b>	577	0.2158	128.92
<b>Mayo</b>	556	0.2158	124.97
<b>Junio</b>	700	0.2121	144.08
<b>Julio</b>	807	0.2093	201.54
<b>Agosto</b>	789	0.2093	198.42
<b>Septiembre</b>	806	0.2093	208.10
<b>Octubre</b>	592	0.2038	134.81
<b>Noviembre</b>	559	0.2038	129.67
<b>Diciembre</b>	504	0.2112	116.92
<b>Enero 2020</b>	391	0.2112	88.90

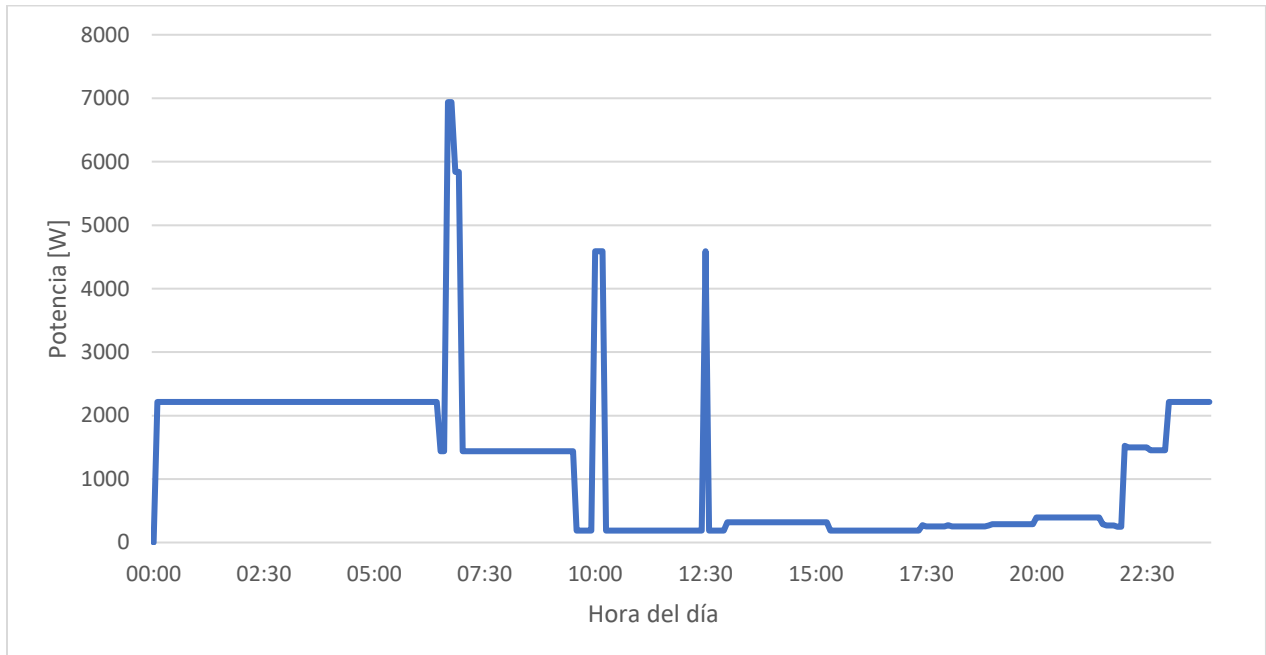
Fuente: Elaboración propia (2020)

En promedio, el consumo de la vivienda es de 611 kWh dado el consumo histórico de un año. Con los precios de tarifa entre cada trimestre del año 2019 hasta Enero 2020, en promedio el abonado paga \$142 por energía consumida al mes en su totalidad de la provista por ENEE por medio de EEH. El dispositivo Vortex NANO dado que es de característica prototipo, con su potencia nominal esperada no alcanza en lo absoluto a cubrir al menos 1% de la demanda. Estos porcentajes se podrán cubrir en cierta medida con nuevas series de Vortex que serán de mayor altura y de mayor potencia nominal.



## 5.2.2 PERFIL DE CARGA

Con los resultados obtenidos por el consumo histórico del abonado, se procedió a elaborar un perfil de carga del consumo característico del sector residencial en Cortés, donde se tomó en cuenta las observaciones de consumo propias del abonado para validar los rangos de pico de potencia que tiene la casa residencial para presentar una mayor precisión en este resultado y análisis.



**Ilustración 21. Perfil de carga del abonado**

Fuente: Elaboración propia (2020)

El perfil de carga elaborado determina que los rangos promedios en el sector residencial de Puerto Cortés donde se aprecian picos de potencia; 6:30 hrs donde la gente se prepara para ir a laborar, 12:40 hrs donde la gente normalmente regresa a casa a almorzar y los picos se obtienen por unidades de refrigeración y/o estufas eléctricas y por último a las 21:00 hrs aproximadamente cuando todos los habitantes de la casa residencial regresan de sus labores.

El comportamiento de la demanda en un abonado del sector residencial es típico en el departamento de Cortés. No se presentan cambios sustanciales haciendo un contraste con otros perfiles de carga de auditorías realizadas en San Pedro Sula.

### 5.3 ANÁLISIS TÉCNICO

Se realiza un estudio técnico desde la ubicación y tipología meteorológica del lugar hasta el propio análisis técnico del dispositivo Vortex NANO. Con la finalidad de comprender la rugosidad del lugar, el clima y otras condiciones que van de la mano del análisis meteorológico antes previamente realizado.

#### 5.3.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto luego de haber analizado la matriz de decisión para la ubicación de instalación debido a las limitantes existentes se procedió a hacer el estudio del lugar como tal, para demostrar las características de rugosidad en esta zona de Puerto Cortés.

El proyecto se encuentra en una zona residencial de carácter no urbano dada la poca edificación y rugosidad de Puerto Cortés, comparándola con otras ciudades como San Pedro Sula que tiene edificios más grandes y en mayor densidad por espacio.



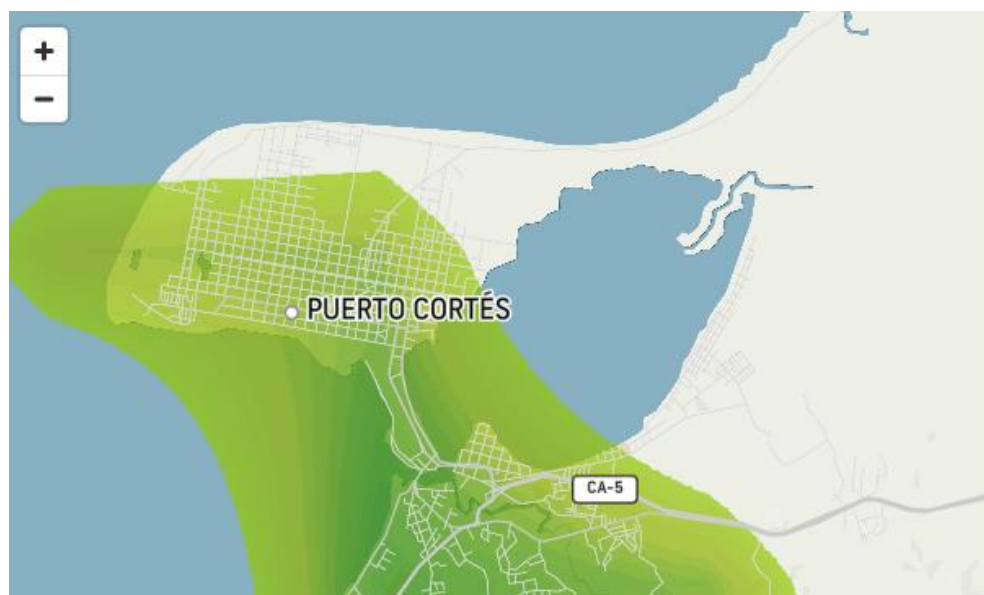
**Ilustración 22. Ubicación del proyecto**

Fuente: (Google Earth, 2020)

Existe una distancia de 3.29 km entre la ubicación de instalación del Vortex y la municipalidad de Puerto Cortés donde está instalada la estación meteorológica de UMA. El polígono ilustrado representa el sector residencial de Puerto Cortés, el cual sería el mercado a apuntar para la instalación de dispositivos Vortex.

### 5.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA UBICACIÓN

El proyecto será ubicado en un terreno plano donde la rugosidad del lugar se destaca por la presencia de árboles y flora en el lugar. Rugosidad urbana como tal no existe en esta zona, dando una premisa básica que la rugosidad será aún menor que la de una zona residencial urbana. Las cualidades como tal del lugar son favorables al aprovechamiento pleno del recurso eólico, considerando espacios amplios, baja rugosidad y una entrada de viento directa desde la Laguna de Alvarado. En la siguiente ilustración se observa las zonas con mayor incidencia de viento en cuanto a tiempo de incidencia. Siendo la mayor parte del sector residencial de Puerto Cortés, apto para generaciones eólicas de pequeñas escalas.



**Ilustración 23. Radar meteorológico en Pto. Cortés**

Fuente: (AccuWeather, 2020)

### 5.3.3 METEOROLOGÍA DEL LUGAR

En esta sección se detallan los resultados obtenidos por medio de la UMA Puerto Cortés y la estación meteorológica obtenida. Todos estos datos deberán ser validados en el análisis de correlación utilizando otras fuentes de obtención de datos TMY.

#### 5.3.3.1 UMA PUERTO CORTÉS

Se obtuvo mediante la UMA de Puerto Cortés una tabulación completa de 8760 datos sobre los promedios de dirección, magnitud de viento, temperatura y entre otros parámetros del lugar de instalación del Vortex NANO. Considerando que datos puedan no ser del todo exactos o precisos dada la distancia que hay entre la municipalidad de Puerto Cortés y el lugar de estudio, se exponen recomendaciones en el siguiente capítulo con respecto a la meteorología del lugar. Los datos obtenidos de la UMA Puerto Cortés son de una correlación de datos entre PVGIS y la propia estación meteorológica en la municipalidad desde 2009 hasta la fecha y se resumen los siguientes datos promedios al año:

**Tabla 6. Promedios al año**

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Magnitud [m/s]</b>	<b>Dirección [°]</b>	<b>Presión Atmosférica [Pa]</b>
36.72	1.91	118.74	101,214.32

Fuente: (UMA, 2020)

**Tabla 7. Máxima al año**

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Magnitud [m/s]</b>	<b>Presión Atmosférica [Pa]</b>
45.73	6.58	102,605.00

Fuente: (UMA, 2020)

**Tabla 8. Mínima al año**

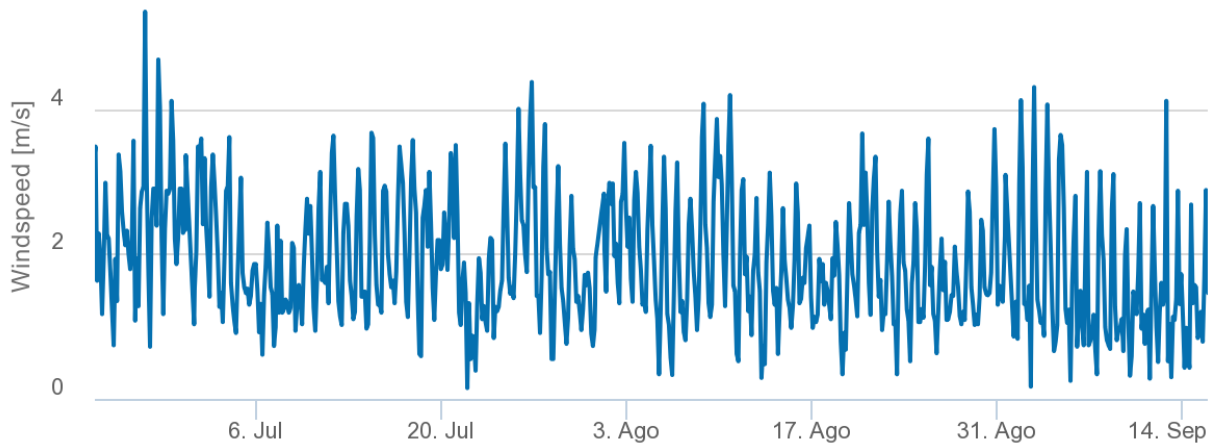
<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Magnitud [m/s]</b>	<b>Presión Atmosférica [Pa]</b>
16.42	0.11	100,357.00

Fuente: (UMA, 2020)

La dirección del viento se toma como referencia el Norte (0°=N) y sentido positivo siguiendo las manecillas del reloj (90°=E). En promedio, el viento incide desde 118° que es ¼ más

después del punto cardinal Este. Sin embargo, Vortex dada su geometría de fabricación no necesita analizar o considerar la dirección del viento. El TMY provisto por la UMA de Puerto Cortés es de intervalos de 1 hora, si bien es cierto resulta que el promedio del viento es de 1.91 m/s a lo largo del año, se calculó la cantidad de tiempo que el viento tiene magnitud mayor a 4 y 5 m/s.

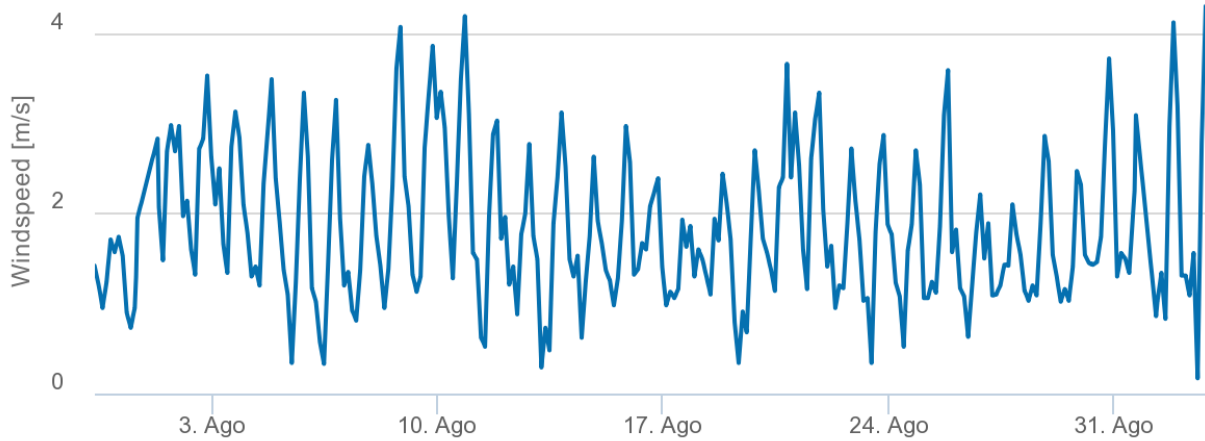
En resultado, el lugar de instalación de Vortex NANO tiene 194 horas en un año que supera el rango de 4 m/s que representa 2.21% del total de horas en un año. Para un rango superior a 5 m/s, el lugar de instalación tiene 56 horas en un año en promedio que representa un 0.64% del tiempo disponible en un año. Se grafica el comportamiento de la magnitud del viento de forma mensual, trimestral y diaria (atípica) en la ubicación del proyecto de las siguientes maneras:



***Ilustración 24. Magnitud de viento trimestral***

Fuente: (UMA, 2020)

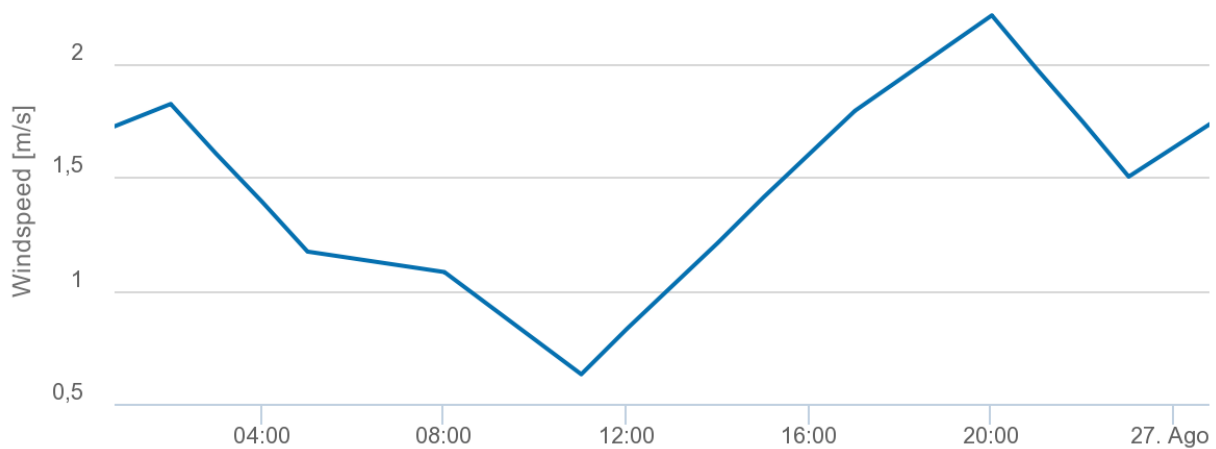
Se utilizó como ilustración el comportamiento promedio entre Julio-Septiembre debido a que en este intervalo se realizará la investigación para realizar el informe entregable. Se observó que el promedio de magnitud del viento en el tercer trimestre del año es de 1.82 m/s con una temperatura promedio de 27°C.



**Ilustración 25. Magnitud de viento mensual**

Fuente: (UMA, 2020)

Se ilustró el comportamiento mensual para el mes de Agosto con respecto a la magnitud del viento promedio, resultando en una incidencia promedio de 1.86 m/s bajo una temperatura promedio de 27°C. Alcanzando una incidencia máxima de 4.2 m/s y una mínima de 0.29 m/s. Según la tabulación meteorológica de la UMA, Vortex en este mes nunca llegaría a producir en su capacidad nominal que es con una incidencia mayor a 5 m/s.



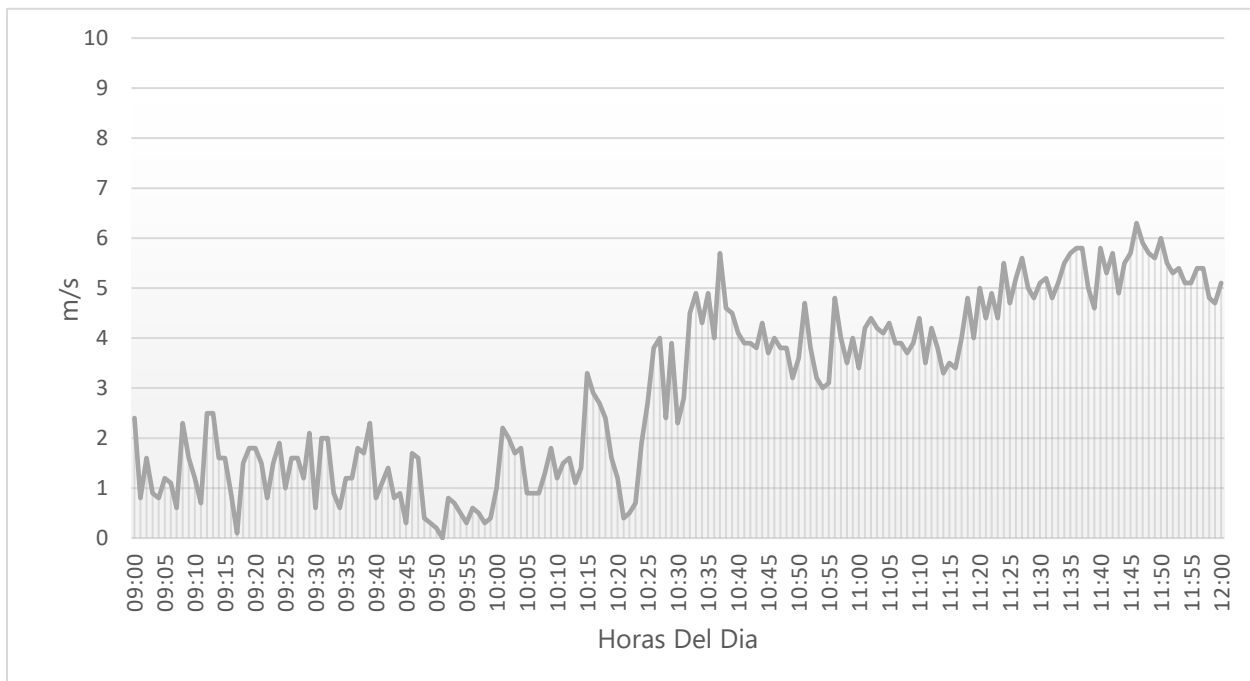
**Ilustración 26. Magnitud de viento diaria**

Fuente: (UMA, 2020)

El comportamiento diario ilustrado es atípico al resto del año debido a que el viento en cuanto a magnitud no tiene un patrón definido semejante a otros días observados en el mes de Agosto. En el 26 de Agosto se observó una magnitud máxima de 2.3 m/s y una mínima de 0.6 m/s. En promedio se obtuvo 1.65 m/s de incidencia, resultando en un día con poco aprovechamiento para el Vortex partiendo de los datos de la UMA.

### 5.3.3.2 MEDICIÓN MANUAL CON ANEMÓMETRO

Se realizó una medición manual en un día atípico (1 Septiembre) para graficar y concluir proyecciones de magnitud de viento para los próximos días. Utilizando un anemómetro de bolsillo, se tabularon datos de viento en intervalos de 1 minuto. Para una mayor precisión, cada dato tabulado por minuto se realizó en base a una medición de intervalos de 15 segundos que es lo máximo que permite promediar el anemómetro. Realizando las 4 mediciones por minuto se procedió a tabular de manera automática el promedio de estas 4 mediciones que representarían un minuto, utilizando una hoja de Excel y se obtuvieron los siguientes resultados:



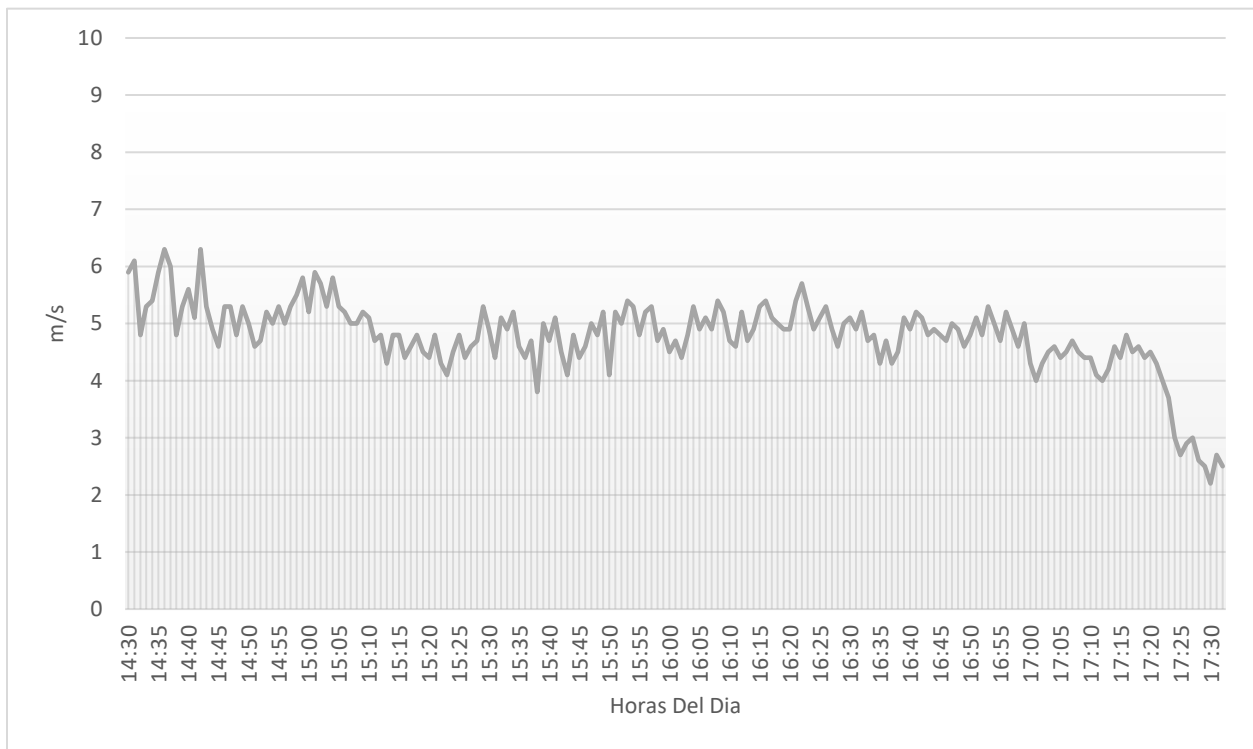
**Ilustración 27. Medición magnitud de viento 9:00-12:00**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Realizando el método mencionado anteriormente, se observa que para un periodo de 9:00-12:00 hay un promedio de 2.98 m/s a una temperatura ambiente promedio de 36°C.

Alcanzando valores de 8.3 m/s máximos y 0.1 m/s mínimos registrados en un instante de tiempo. En este periodo hubo una disposición de recurso eólico mayor o igual a 5 m/s de 32 minutos donde 181 minutos posibles en ese rango termina representando un 18% del total de tiempo en el cual el dispositivo podrá generar en condiciones nominales.

Se procedió a continuar con la medición para el tiempo entre 14:30-17:30. Donde se obtuvieron mejores resultados en cuanto a magnitud y tiempo donde el recurso se mantuvo alto para el día atípico. Se graficaron los siguientes resultados:



**Ilustración 28. Medición magnitud de viento 14:30-17:30**

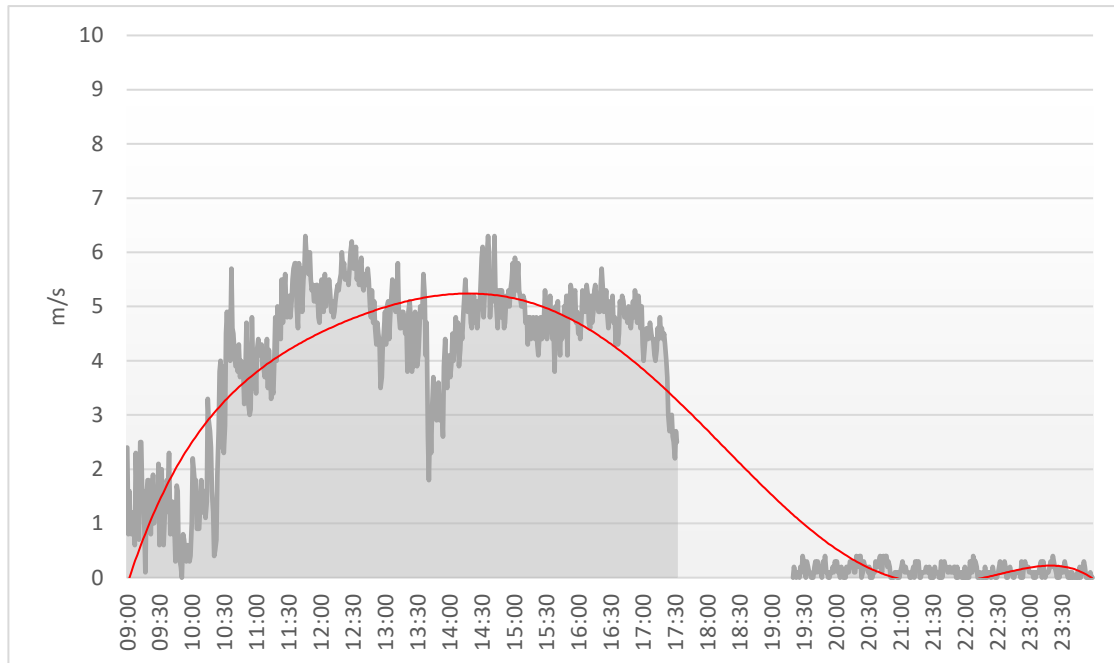
Fuente Elaboración propia (2020)

Existió un promedio de 4.8 m/s a una temperatura aproximada de 29.8°C. Alcanzando valores instantáneos máximos de 8.1 m/s y registrando mínimas de 0.4 m/s. En este periodo hubo una disposición de recurso eólico mayor o igual a 5 m/s de 73 minutos dentro de un rango de 181 minutos representando un 40% del total de tiempo en donde el dispositivo podrá generar en condiciones nominales.

Para un día atípico, el comportamiento del viento para el inicio de Septiembre representó en promedio que Vortex podrá generar bajo una incidencia de viento de 2.72 m/s, un recurso casi



a la mitad referenciando 5 m/s como nominal. En condiciones nominales, el dispositivo Vortex pudo generar en potencia nominal un 20% en el intervalo de 9:00-23:59 horas. Se deberá tomar en cuenta para realizar proyecciones la rugosidad del lugar que condicionará el número de Reynolds del viento. El perfil final realizado para el día atípico se muestra en la siguiente manera:



**Ilustración 29. Perfil de recurso eólico para 1 día atípico**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Existieron ciertas limitaciones para poder tabular los datos de magnitud de viento entre las 17:30-19:30, sin embargo, se puede observar bajo la línea de tendencia como se iba a proyectar el comportamiento del recurso que, desde esa hora de paro, el recurso se redujo constantemente hasta alcanzar valores mínimos de 1 m/s. Un análisis más preciso y completo se realizará mediante la instalación de la miniestación meteorológica que servirá para poder validar los datos desde las 3 fuentes disponibles; UMA Puerto Cortés, miniestación y anemómetro manual de bolsillo.

### **5.3.4 VORTEX NANO Y PROYECCIÓN TACOMA**

El análisis de densidad de potencia del Vortex NANO servirá para comprender su comportamiento dentro de un intervalo de tiempo bajo una incidencia de viento específica. Con los resultados obtenidos se podrá proyectar la generación futura del Vortex considerando

debidamente sus especificaciones técnicas, limitantes y cambios en la rugosidad del lugar. Se empieza a tabular las especificaciones del Vortex NANO:

***Tabla 9. Especificaciones técnicas Vortex NANO***

<b>Potencia Nominal</b>	1 ~ 1.1 W
<b>Voltaje Salida</b>	5 VDC
<b>Altura total</b>	0.85 m
<b>Ángulo máx. de oscilación</b>	4.5° por lado, 9° total
<b>Frecuencia máx.</b>	14 Hz
<b>Velocidad Arranque</b>	2.6 m/s
<b>Velocidad Nominal</b>	~ 6 m/s
<b>Temp. Admisible</b>	-25°C ~ 55°C
<b>Almacenamiento</b>	3000 mAh

Fuente: Elaboración propia (2020)

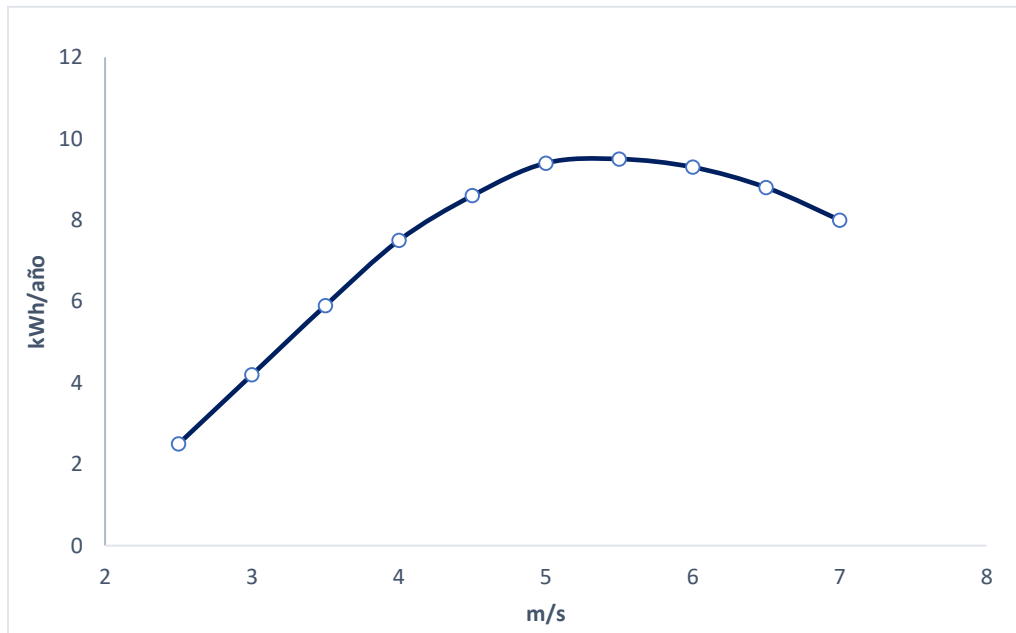
#### ***5.3.4.1 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN***

Dada la calibración necesaria del dispositivo debido a una rotura entre el mástil y el Osc2 (pieza que cubre el alternador), desafortunadamente la reparación del dispositivo resultó en una asimetría axial. Reconociendo que el dispositivo es cilíndrico vertical y su sección transversal es circular, no se puede determinar por medio de alguna arista la cara frontal posterior o de perfil, es por ello por lo que se determinó utilizar el logo impreso en el Vortex como referencia frontal. Por lo tanto, la asimetría se representa desde la altura del alternador hasta la punta del mástil con respecto a la vertical natural; resultando en 2° de inclinación hacia la parte posterior del Vortex. En su instalación final, el plano frontal del dispositivo apunta hacia 64° NE referenciando el Norte con 0°. Esta asimetría representa una baja sustancial del rendimiento aerodinámico del dispositivo y se verá afectado en el rendimiento eléctrico cuando el viento incida entre el Oeste y el Norte por el efecto de vorticidad inducido pasando el mástil.

#### ***5.3.4.2 RENDIMIENTOS TEÓRICOS***

La tecnología Vortex Bladeless sigue siendo estudiada para alcanzar conceptos bien establecidos y definir un concepto permanente como tal. Los rendimientos relacionados a la

tecnología cada vez se van asemejando más a la realidad de su generación real, aunque hay que considerar siempre que los resultados serán todavía un poco orientativos por la misma razón. Se ilustrará el rendimiento teórico según su ficha técnica hasta el momento que actualmente se está definiendo con mayor precisión gracias a la campaña de estudios y análisis beta.



**Ilustración 30. Rendimiento teórico Vortex NANO**

Fuente: (Vortex NANO Datasheet, 2019)

Este rendimiento va de la mano en gran proporción de flujos controlados de número de Reynolds y una incidencia de viento constante, donde en campo real, existe una variación de la magnitud del viento que se puede observar desde la campana de Weibull explicado en el marco teórico. Sin embargo, pruebas realizadas con anterioridad y la actual servirán para ir dándole mayor validez al rendimiento tanto aerodinámico como de generación.

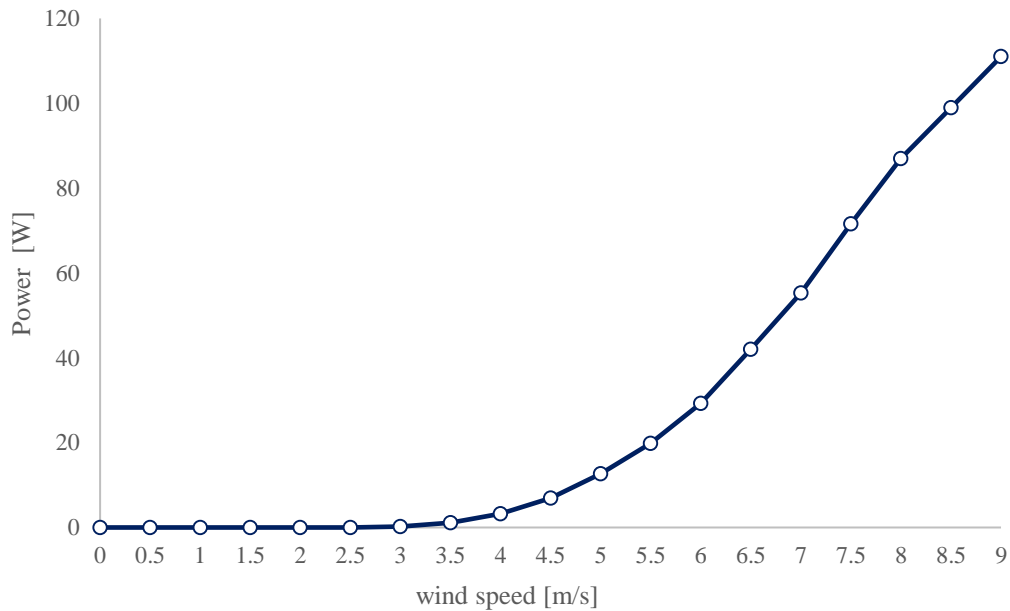
El factor de planta o rendimiento del aerogenerador dependerá, al igual que cualquier aerogenerador, de su tamaño y la velocidad del viento. La interacción de vórtices sobre el Vortex representa la resonancia de la estructura con el viento, resultando en generación y para otras máquinas, estos vórtices representan desventajas. El factor de planta dependerá mucho del número de Reynolds para pequeños aerogeneradores que en su mayoría son de eje vertical, Vortex incluido, ronda con un rendimiento cercano a 10~15% en condiciones normales resultando en una cercanía a los aerogeneradores Darrieus, pero siempre mayor a este tipo de aerogenerador

y al Savonius con mayor diferencia. El rendimiento y el comportamiento para el Vortex Tacoma que es la serie de Vortex que apunta al mercado real tiene las siguientes características y rendimientos teóricos:

**Tabla 10. Especificaciones técnicas Vortex Tacoma**

<b>Potencia Nominal</b>	100 W
<b>Voltaje Salida</b>	24 V DC
<b>Altura total</b>	2.75 m
<b>Ángulo máx. de oscilación</b>	3° por lado, 6° total
<b>Frecuencia máx.</b>	7.5 Hz
<b>Velocidad Arranque</b>	3 m/s
<b>Velocidad Nominal</b>	~ 9 m/s
<b>Temp. Admisible</b>	-25°C ~ 60°C
<b>Potencia Máxima</b>	109 W

Fuente: (Vortex Tacoma Datasheet, 2019)

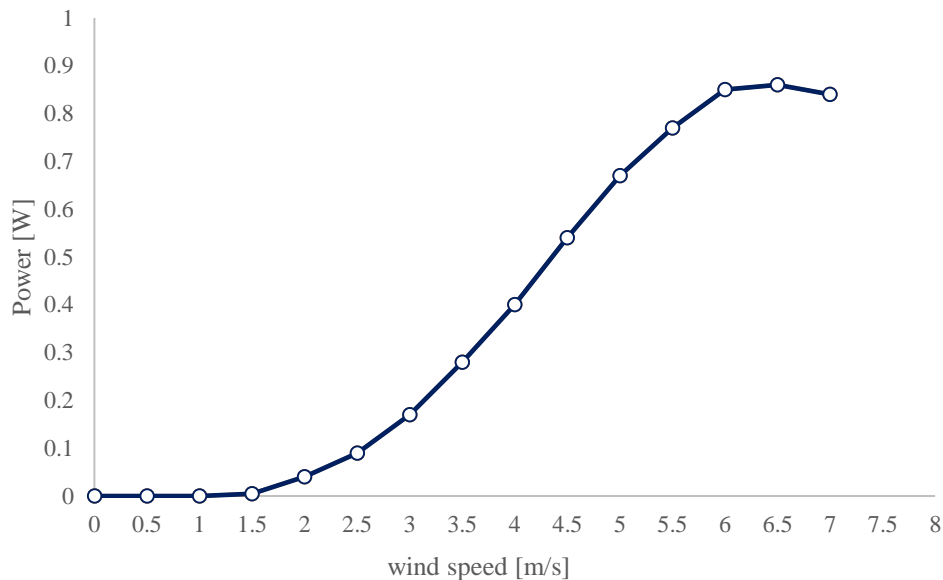


**Ilustración 31. Rendimiento teórico Vortex Tacoma**

Fuente: (Vortex Tacoma Datasheet, 2019)

### 5.3.4.3 DENSIDAD DE POTENCIA VORTEX NANO

La variación de viento en la ubicación del proyecto no tiene cambios tan radicales, en la tabulación de datos meteorológicos con el anemómetro de bolsillo se observó que entre intervalos de 1 minuto no había cambio drástico entre ciertos periodos de tiempo. Es por ello por lo que se puede determinar con suficiente tiempo la energía generada según la magnitud del viento presente. Ubicando el anemómetro por encima del Vortex y midiendo la salida se puede tabular el rendimiento del Vortex NANO considerando su recurso eólico presente y considerando cierta incertidumbre por la asimetría axial. Para rangos nominales, se consideró medir 2 veces la energía generada comparando la incidencia del viento según su dirección debido a la asimetría para promediar la pequeña brecha de diferencia entre una generación y otra. Se obtuvo el siguiente resultado:



**Ilustración 32. Curva de potencia Vortex NANO**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Las mediciones se realizaron de manera repetitiva durante 2 semanas, la mayor validez de la curva de potencia está entre 0-3.5 m/s ya que la mayor parte del tiempo en un día los rangos de velocidad de viento se encuentran en ese rango. Para sus potencias nominales se requirió medir para distintas direcciones de incidencia de viento por la asimetría. Sin embargo, la

probabilidad de obtener magnitudes de viento en distintas direcciones es muy pequeña, hasta el momento solo se obtienen registradas estas magnitudes desde 20° NO (340° N, siendo N=0) y 215° SO. La asimetría puede estar condicionando la energía generada y es por eso por lo que se necesita esperar otra estación del año para obtener otras magnitudes de 5-7 m/s desde otras direcciones para tener una mayor precisión.

#### 5.3.4.4 POTENCIA EN EL VIENTO PTO. CORTÉS

La potencia en el viento será utilizada para analizar ciertos parámetros para proyecciones del Vortex NANO y Vortex de mayores alturas. Considerando ciertos parámetros reales para el cálculo de la potencia del viento, resultan las siguientes premisas básicas para realizar la tabulación de potencia en el viento disponible.

**Tabla 11. Premisas para cálculo de potencia del viento; Densidad de aire**

Temperatura [°C]	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]
30	1.165
35	1.146
38 (interpolación)	1.135
40	1.127

Fuente: (Wind Denmark, 2020)

**Tabla 12. Premisas para cálculo de potencia del viento; Viscosidad**

Temperatura [°C]	Viscosidad cinemática
0	1.33 x10 <sup>-5</sup>
20	1.50 x10 <sup>-5</sup>
38 (interpolación)	1.67 x10 <sup>-5</sup>
50	1.79 x10 <sup>-5</sup>

Fuente: (Energinet, 2020)

Obteniendo las premisas básicas para 38°C siendo la temperatura promedio para el tercer trimestre del año en Puerto Cortés, se procedió a calcular la potencia disponible en el viento dada su magnitud a una altura de 4mts de instalación y una rugosidad de 0.10 dada la característica del lugar:

**Tabla 13. Potencia disponible en el viento, altura=4mts**

P [W/m <sup>2</sup> ]	m/s
0	0
0.01	0.5
0.05	1
0.16	1.5
0.39	2

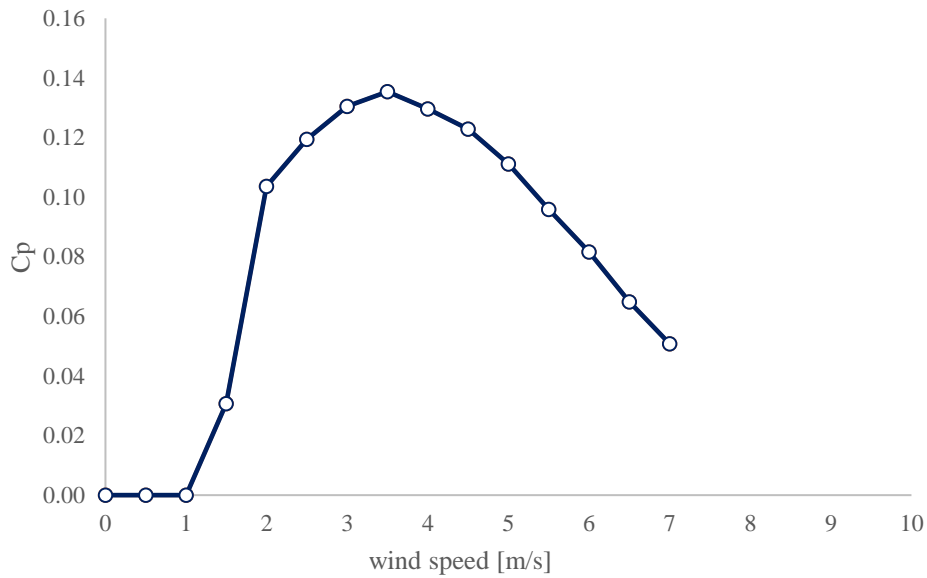
0.75	2.5
1.30	3
2.07	3.5
3.09	4
4.40	4.5
6.03	5
8.03	5.5
10.42	6
13.25	6.5
16.55	7
20.35	7.5
24.70	8
29.62	8.5
35.17	9

---

Fuente: Elaboración propia (2020)

#### *5.3.4.5 COEFICIENTE DE POTENCIA*

El coeficiente de potencia nos indica que tan eficiente es un aerogenerador; la eficiencia con la que el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Un parámetro bien utilizado para pruebas técnicas de los aerogeneradores. Sin embargo, para estudios de Vortex NANO se realizará un coeficiente de potencia en análisis de campo real. Para este coeficiente se necesitan las potencias del dispositivo (curva de rendimiento Vortex NANO) y la potencia disponible en el viento. A priori, se enfatiza en que el Vortex NANO al ser un dispositivo de carácter experimental, tendrá una eficiencia muy baja debido a que su potencia nominal es de 1 W y en comparación a la potencia del viento disponible, es prácticamente nula. Sin embargo, este coeficiente de potencia servirá para proyectar lo que sería la eficiencia de aerogeneradores Vortex de mayores alturas como el Tacoma.



**Ilustración 33. Gráfico de Cp para Vortex NANO**

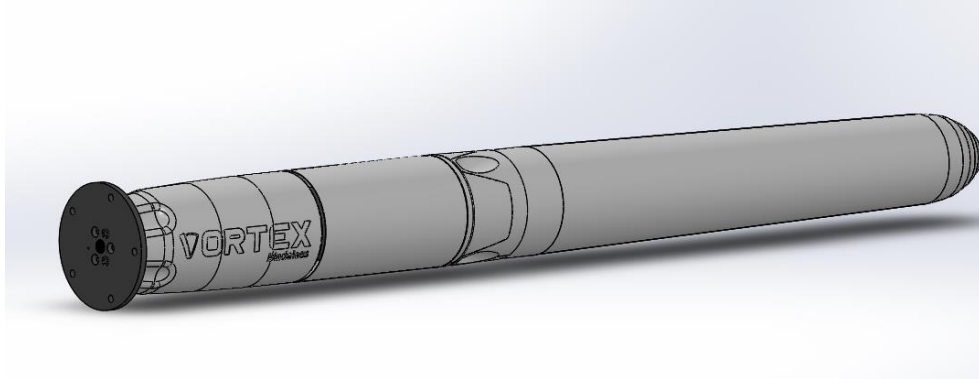
Fuente: Elaboración propia (2020)

En el caso de Vortex NANO, los resultados detallan que bajo velocidades en un rango de 2.5-3 habrá una mayor eficiencia para aprovechar la energía del viento y convertirla a energía eléctrica. Sin embargo, se considera que los resultados obtenidos del coeficiente de potencia son influenciados en un grado sustancial por la asimetría del dispositivo. Esto debido a que se observa como en la curva de rendimiento el aerogenerador no alcanza en ningún momento su potencia nominal con vientos nominales provenientes de la misma dirección. En definitiva, una asimetría en el equipo genera que el aerogenerador tienda a oscilar con mayor facilidad bajo ciertas direcciones.



## 5.4 DISEÑO DE MODELO 3D

Se realizó el modelo final del Vortex NANO creando primero sus piezas individuales y luego ensamblando cada una hacia llegar al modelo final renderizado. Se obtuvo un modelo de 0.85 cm de altura con un diámetro en su mástil siendo la mitad de la altura entre pletina y faldón.

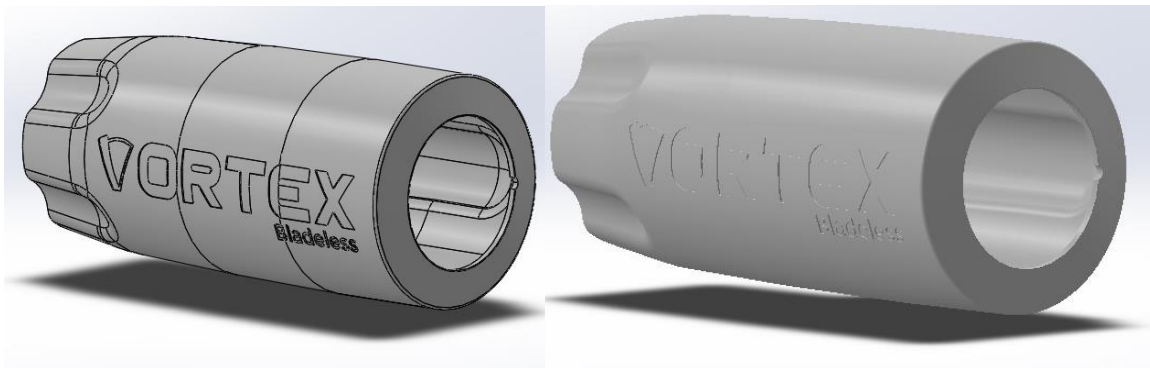


**Ilustración 34. Modelo final renderizado**

Fuente: Elaboración propia (2020)

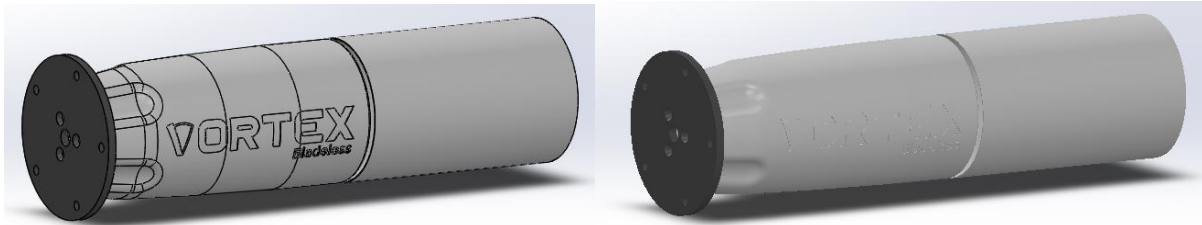
### 5.4.1 INTEGRACIÓN DE PARTES

Se comenzó el modelo del aerogenerador desde su soporte hacia el mástil para determinar las características finales del modelo y realizar una pronta simulación del flujo del viento. Una vez concluida la sección de soporte, se procedió a modelizar el faldón que recubrirá la varilla de fibra de carbono y la pletina grande que es la pieza donde se acopla el dispositivo hacia la superficie o base.



**Ilustración 35. Soporte final y renderizado**

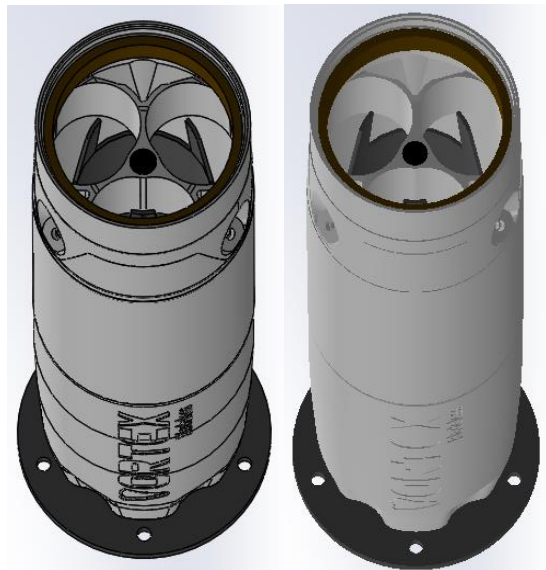
Fuente: Elaboración propia (2020)



**Ilustración 36. Base final y renderizada**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Con la base modelada, se procedió a ensamblar las partes internas del dispositivo como las pletinas intermedias, la varilla de fibra de carbono que sostendrá el alternador y los demás componentes que servirán de acople con los imanes de neodimio y soporte del mástil. El alternador no se diseñó ya que es un componente eléctrico que no interfiere en la simulación del prototipo.



**Ilustración 37. Modelo final y renderizado sin mástil**

Fuente: Elaboración propia (2020)

#### **5.4.2 VOLUMEN DE CONTROL**

El software utilizado para las primeras simulaciones computacionales utilizado fue SolidWorks, estableciendo a priori un volumen de control para el diseño y espacio de análisis el cual abarcará la simulación para el estudio del flujo incidente sobre el dispositivo Vortex. Se establecieron las premisas básicas a analizar que son velocidades máximas de viento, presión atmosférica, altura de instalación y potencia nominal del dispositivo.

La altura de instalación es de 3.8 metros a 101,010 Pa de presión atmosférica promedio, utilizando una velocidad máxima de 7.8 m/s y 1 W de potencia nominal.

### **5.4.3 PRUEBAS**

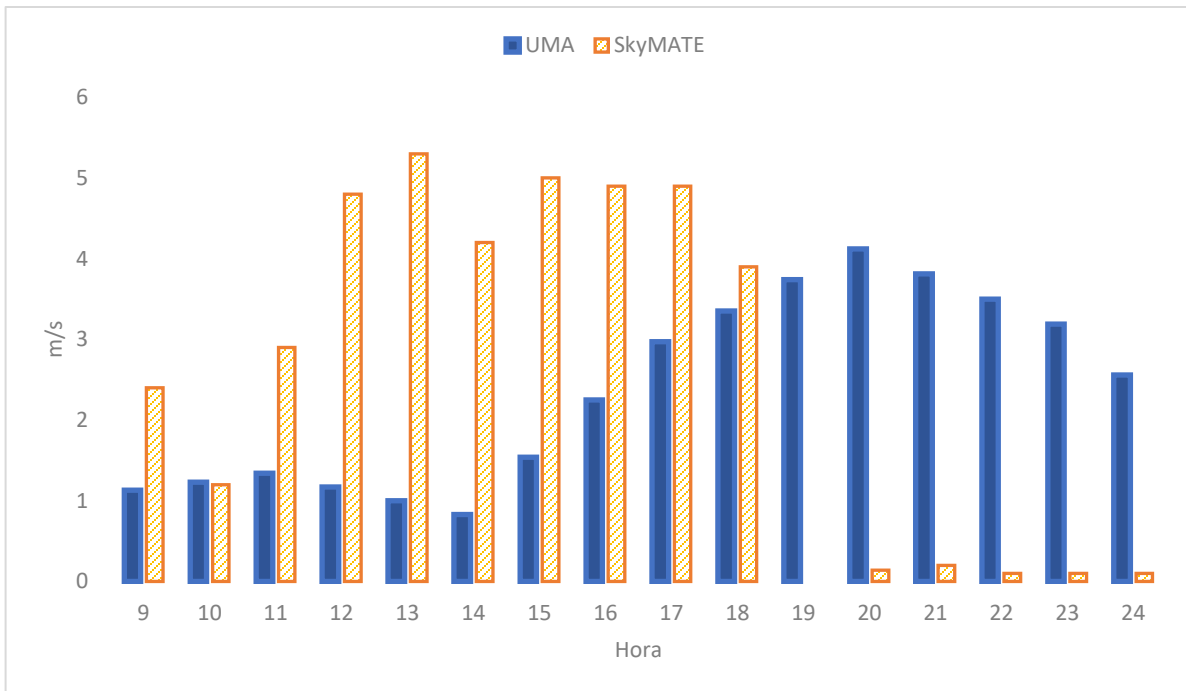
Luego de definir el dominio de control para el volumen del estudio, se procedió a realizar las pruebas para visualizar el comportamiento del viento sobre el dispositivo Vortex NANO que permitieron predecir el comportamiento de la estructura con respecto al viento incidente bajo el volumen de control. Sin embargo, las pruebas realizadas solo se realizaron para entender el efecto estela de la estructura y no para realizar proyecciones de generación ya que eso se realizó en campo.

## **5.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN**

Una vez realizado los análisis técnicos, el análisis de demanda y el análisis de la meteorología del lugar se procede a realizar un análisis de correlación que podrá explicar la interacción y comportamientos de las distintas variables a medir. Se realizará un análisis de correlación entre los datos de meteorología con los distintos equipos usados, un análisis demanda-generación y un análisis de potencias en el viento y en los aerogeneradores.

### **5.6.1 METEOROLOGÍA**

La estación meteorológica de la UMA de Puerto Cortés se encuentra a más de 3 km de distancia de la ubicación del proyecto y al conocer la marca del equipo, se presumía un grado de error en la exactitud de valores dada la distancia. Es por ello por lo que se consideró adquirir una miniestación y un anemómetro práctico para validar con mayor precisión los datos.



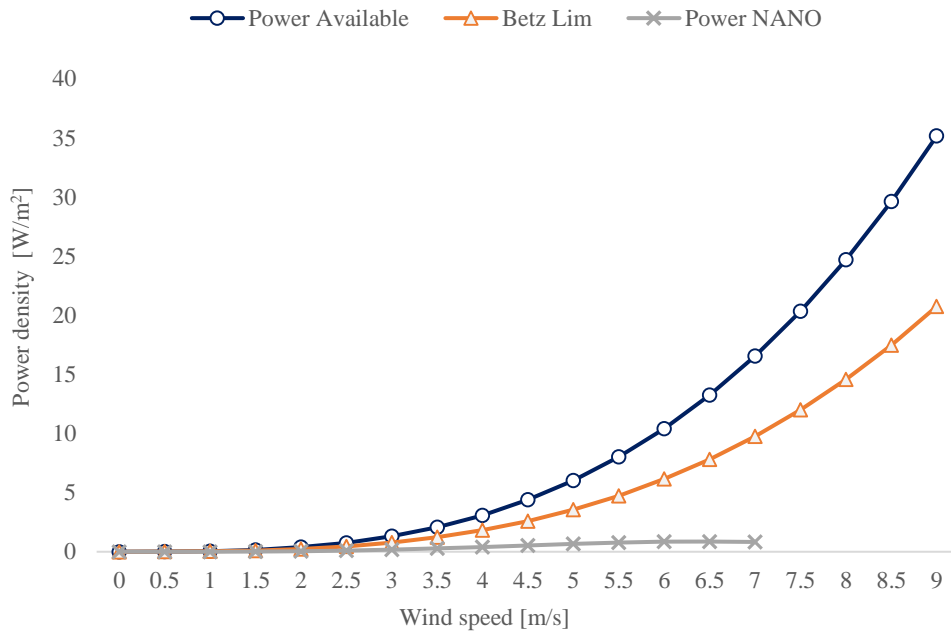
**Ilustración 38. Validación de datos meteorológicos**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Cabe destacar que los datos meteorológicos de la estación de la UMA Puerto Cortés son para una instalación y lectura a 7 metros de altura y la del anemómetro SkyMATE es a una instalación a 5.5 metros de altura ya que deberá de ir por encima del Vortex que se encuentra a 4 metros. Sin embargo, los datos obtenidos reflejan una desviación muy grande entre los rangos de velocidad por hora de las medidas por ambos equipos. Para la UMA hay un mayor rango de velocidades en la noche siendo totalmente opuesto a las mediciones del anemómetro. Considerando que las mediciones hechas con el anemómetro son hechas en tiempo real y en el justo sitio del proyecto, se entiende que la distancia entre estación UMA y el proyecto es lo suficientemente extensa para no dotar de datos meteorológicos exactos.

### 5.6.2 POTENCIA DISPONIBLE

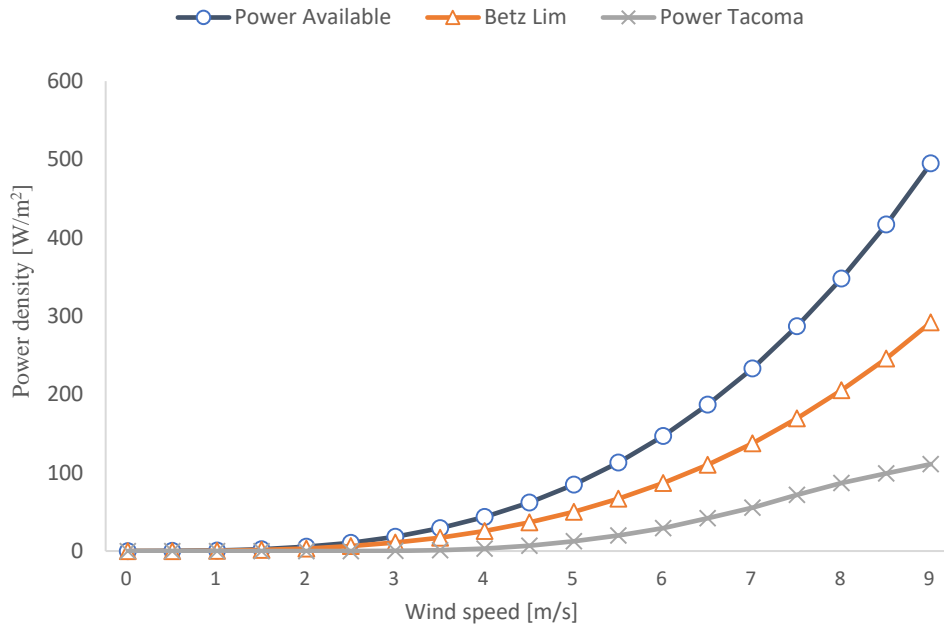
Observando la potencia disponible en el viento a la altura de instalación, se determinó que es importante realizar una gráfica donde se observe que tanto porcentaje cubre el Vortex (NANO o Tacoma) y que tanto se va acercando al límite de Betz. En base a eso, se grafican la potencia disponible en el viento, el límite de Betz que será el 59.3%, la generación de Vortex NANO y la proyección para Vortex Tacoma.



**Ilustración 39. Potencias disponibles NANO**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Dado que con la longitud del mástil para el Vortex NANO de menos de medio metro, su potencia nominal se conoce a priori que será muy bajo, limitando así su aprovechamiento observando la potencia disponible en el viento que alcanza hasta los 35 W/m<sup>2</sup> todavía sin filtrar esa potencia con el límite de Betz. Sin embargo, para proyectar un análisis más real para el mercado, se procedió a realizar el mismo análisis para Vortex Tacoma partiendo de los resultados obtenidos por Javier García en su análisis sobre la tecnología Vortex Bladeless.



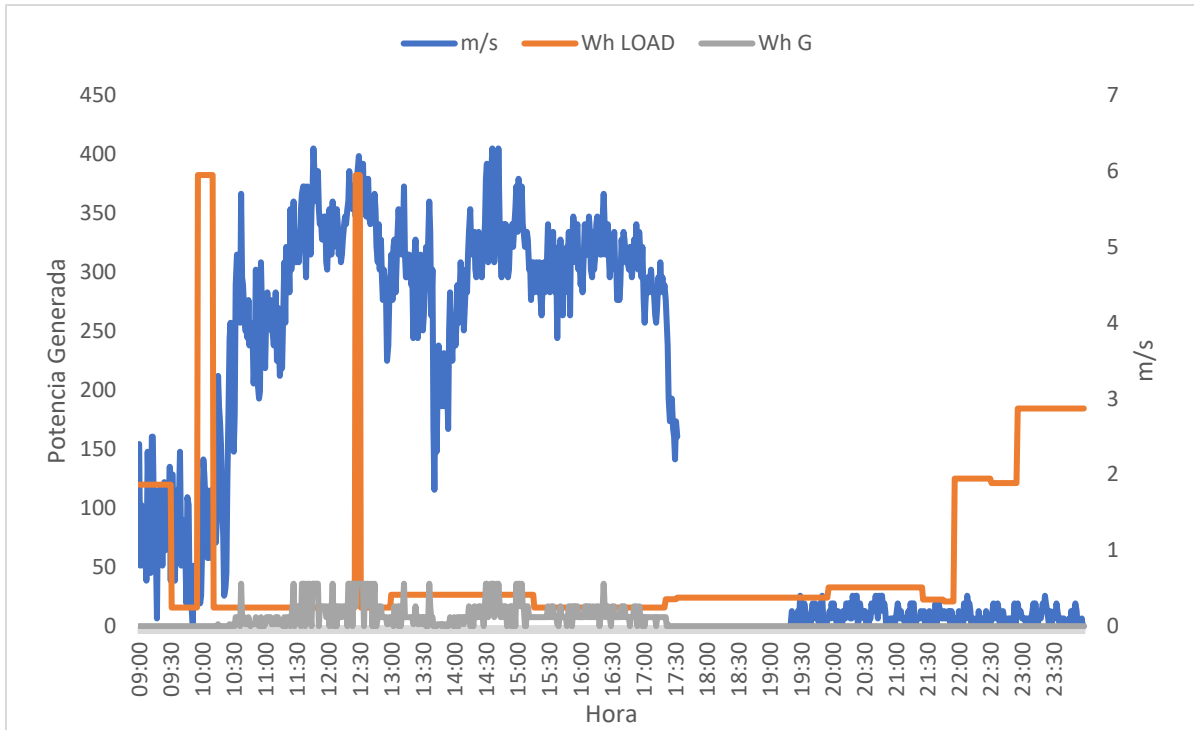
**Ilustración 40. Potencia disponible Tacoma**

Fuente: Elaboración propia (2020)

El resultado del gráfico demuestra que Vortex Tacoma alcanzando su potencia nominal de 100 W, aprovecha un tercio de la potencia real disponible pasando el límite de Betz y al considerar un emplazamiento utilizando Vortex Tacoma, resulta bastante económico obtener una potencia nominal considerable a base de energía eólica.

### 5.6.3 DEMANDA-GENERACIÓN

Tomando en cuenta el análisis realizado para la demanda desde una auditoría energética y el análisis técnico para el comportamiento de producción de Vortex dada la magnitud de viento presente, se procedió a graficar los resultados con respecto a una demanda típica del sector residencial de Puerto Cortés y la proyección de generación de un Vortex.



**Ilustración 41. Correlación consumo-generación**

Fuente: Elaboración propia (2020)

Se realizó el análisis de correlación entre el recurso eólico disponible en un día atípico, la demanda promedio de energía (Wh LOAD) y la generación de una proyección del aerogenerador Vortex Tacoma (Wh G). Se confirmó que para condiciones reales en campo de Puerto Cortés utilizando un Vortex Tacoma, se puede satisfacer un 9.8% de la energía demanda en promedio, este promedio irá incrementando si se considera un emplazamiento de más dispositivos Vortex Tacoma. Resultando en un arreglo eólico de potencia nominal considerable a un bajo precio dado el nulo mantenimiento y la materia prima requerida para crear un modelo.

Dado los resultados obtenidos sobre los análisis técnicos y correlacionales, se procedió a detallar todas las conclusiones sobre el proyecto de investigación, sus implementaciones y recomendaciones.

## VI. CONCLUSIONES

1. Se realizó un análisis de demanda sobre un abonado del sector residencial con un promedio de consumo de 611 kWh al mes. Utilizado en el análisis correlacional, se obtuvo en base a la proyección del Vortex Tacoma una cobertura de demanda del 9% en promedio con un solo dispositivo para el mes de Septiembre.
2. En base al tipo de rugosidad alrededor del proyecto, determinando un coeficiente de fricción del 0.10 e interpolando la densidad del aire a  $1.135 \text{ kg/m}^3$  se realizó el gráfico de potencia disponible en el viento para la zona de Puerto Cortés. Resultando en una densidad de potencia disponible hasta de  $35 \text{ W/m}^2$  a 4 metros de altura y  $500 \text{ W/m}^2$  a 8 metros de altura sin considerar el límite de Betz (59.7%).
3. Del gráfico de rendimiento y  $C_p$  del Vortex NANO se determinó que su generación de energía nominal es alcanzando a una magnitud de  $\sim 7 \text{ m/s}$ ; sin embargo, el pico de eficiencia (0.14) es alcanzado con una magnitud de 2-3 m/s reconociendo que esas magnitudes presentes son las que más predominan en sectores más robustos.
4. Se determinó que el dispositivo Vortex Tacoma ubicado en Puerto Cortés tendrá un rendimiento en campo real del 30% a una altura de 8 mts de instalación. Un rendimiento mayor que el de otros aerogeneradores de eje vertical que alcanzan un 20% en condiciones ideales y el  $C_p$  alcanza su punto máximo en una magnitud de  $\sim 6 \text{ m/s}$ . Dada las diferencias de altura y tamaño con Vortex NANO, las magnitudes de generación y comportamiento son menores que Vortex Tacoma. En general, la curva de rendimiento de ambos dispositivos tendrá la misma tendencia, pero a distintas escalas de viento.
5. Vortex Bladeless en general representa actualmente una alternativa para un autoconsumo aislado en el sector residencial debido a su producción de energía en un emplazamiento. Para zonas residenciales trabajaría perfectamente en sinergia con instalaciones fotovoltaicas considerando las ventajas semejantes de ambas por su tipo de conversión. Para zonas aledañas, Vortex tiene gran aplicabilidad para la acumulación de energía y utilizarla en iluminación. Sin embargo, la alternativa para el uso de Vortex en el sector residencial y/o urbano será con emplazamientos de dispositivos Vortex y no de uso único de un dispositivo.



## VII. RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones anteriores, se enumeran ciertas recomendaciones que van de la mano de las preguntas de investigación y objetivos específicos.

- 1) Habiendo realizado una auditoria energética de un abonado cercano al lugar de instalación del Vortex, se recomienda realizar un análisis de demanda con población y muestra más extenso ya sea departamental o nacional.
- 2) Realizar el mismo análisis para otras ciudades de mayor coeficiente de fricción dada la condición urbanística que presenten, para estos casos la rugosidad puede alcanzar un valor de 0.4 y condicionará en cierta medida la generación de energía y rendimiento.
- 3) Extender el tiempo de estudio y análisis del dispositivo para distintas escalas y alturas y rugosidad presente en otros lugares del sector residencial independiente de la ciudad para tener mayor certeza en rendimientos obtenidos.
- 4) Corroborar los datos obtenidos en campo en Puerto Cortés con los datos obtenidos de otros dispositivos de Vortex con rugosidades semejantes.
- 5) Para la instalación del Vortex, se recomienda utilizar otros ángulos de instalación como totalmente horizontal o una variación de ángulos para estudiar rendimientos.
- 6) El estudio técnico realizado fue en función de un sistema exclusivo de Vortex, por lo que se recomienda realizar un análisis técnico híbrido y un análisis correlacional del sistema híbrido con respecto a la demanda.
- 7) Determinar costos aproximados de producción en masa de dispositivos Vortex, considerando precios marginales y materia prima para realizar estudios económicos previo a su inmediatez al mercado en general.
- 8) Dada la inmadurez actual de la tecnología emergente Vortex, se recomienda una evolución de trabajo futuro para realizar nuevos estudios que determinen mayores y mejores implementaciones que incluyan en mejoras estructurales.

## VIII. APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN

Dado el alcance de estudio, el diseño experimental y todos los resultados obtenidos dentro del análisis se puede determinar con mayor precisión las áreas potenciales a la implementación correcta y aplicación debida del dispositivo Vortex, independientemente la serie o potencia.

Partiendo de los modelos actuales en cuanto a generación (NANO y Tacoma), se determina que actualmente la implementación del Vortex se delimita en sistemas híbridos como preferencia. Esto se concluyó por su baja generación individual en cuanto a magnitud, que no satisface un porcentaje considerable de una demanda típica residencial de energía (instalando un dispositivo). Vortex NANO y seguramente Tacoma, son aplicables para un dimensionamiento aislado en zonas aledañas, donde la electrificación no es viable todavía, debido al bajo índice de electrificación en Honduras se da con mucha viabilidad implementar esta tecnología para la acumulación de energía que alimente consumos por iluminación y otras misceláneas.

Una buena implementación y aplicación de Vortex, será para uso híbrido con sistemas solares fotovoltaicos después de aproximadamente 8 años de uso donde el arreglo solar ya cuenta con un porcentaje considerable de degradación que limita su generación. Entre el año 8-10 del arreglo solar con su degradación, resulta que al pasar de los años el inversor se va volviendo sobredimensionado y esto genera una reducción en su eficiencia. Para compensar la generación perdida por la degradación del Vortex, se puede instalar un arreglo de dispositivos Vortex que ayuden a compensar esta energía y mantener la eficiencia del inversor y en ciertos casos, evitar el cambio del inversor.

## **IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL / TRABAJO FUTURO**

Tomando en cuenta los datos resultantes y las conclusiones obtenidas después de haber elaborado el proyecto de investigación, se procede a describir una segunda etapa del proyecto que debe de realizarse para un análisis más extenso.

Debido a las limitantes actuales en el proyecto de investigación, es requerido un estudio más amplio y de mayor muestro/población para precisar los resultados obtenidos en la curva de rendimiento. Utilizando un equipo de laboratorio especializado y herramientas adecuadas para medición y análisis de comportamiento estructural del dispositivo. En la segunda etapa del proyecto no será indispensable el uso de un Vortex NANO, se podrá optar por un dispositivo Vortex Tacoma que tiene los mismos principios, pero con mayores magnitudes de producción.

Independientemente del dispositivo a utilizar en la segunda etapa, es requerido un análisis en un ambiente aislado donde no haya electrificación disponible y en un sistema híbrido donde exista la sinergia del Vortex con algún arreglo solar. Se recomienda un sistema híbrido eólico-solar debido a que en Cortés predomina el uso de instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo. Con este estudio se podrán contestar incógnitas como la posible producción de energía simultánea en el sistema híbrido, un cálculo de LCOE más bajo, el comportamiento de la demanda y generación, finalmente una guía para una buena instalación híbrida que considere las limitaciones tecnológicas de ambas fuentes para una sinergia muy eficiente.

## X. BIBLIOGRAFÍA

AccuWeather. (2020). *Radar del tiempo de Honduras* | AccuWeather.

<https://www.accuweather.com/es/hn/national/weather-radar>

Billiah, Y. (1991). *Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks*.

<https://www.ketchum.org/billah/Billah-Scanlan.pdf>

Brizuela, A., & Aguirre, C. (2004). *Energía no convencional—Solar y eólica—Para escuelas rurales en la provincia de Entre Ríos* [Universidad Nacional de Entre Ríos].

[https://elibro.net/es/ereader/unitechn/93792?as\\_all=e%C3%B3lica&as\\_all\\_op=unaccent\\_\\_icontains&fs\\_page=2&prev=as](https://elibro.net/es/ereader/unitechn/93792?as_all=e%C3%B3lica&as_all_op=unaccent__icontains&fs_page=2&prev=as)

Cremades Botella, A. (2019). *Implementación de nuevas técnicas de medida en un túnel de viento subsónico para bajo número de Reynolds*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/126294>

Domínguez, A. (2020). *Generadores eólicos de baja potencia*. E Libro.

<https://elibro.net/es/lc/unitechn/titulos/27291?prev=bf>

*El coeficiente de potencia*. (2020). [http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/cp.htm)

[content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/cp.htm](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/cp.htm)

Energinet. (2020). *Energinet* | Energinet. <https://energinet.dk/>

FreeCAD. (2020). *FreeCAD: Your own 3D parametric modeler*. <https://www.freecadweb.org/>

Gonzales, J. G. (2019). *Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless*

[Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Carlos III de Madrid]. [https://e-](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29997/TFG_Javier_Garcia_Gonzalez_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29997/TFG\\_Javier\\_Garcia\\_Gonzalez\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29997/TFG_Javier_Garcia_Gonzalez_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Google Earth. (2020). *Google Earth*.

Meteomóstoles, A. E. de. (2012). *Móstoles (Madrid)—Agencia Estatal de Meteorología—AEMET. Gobierno de España*. Meteomóstoles.

[http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/municipios/mostrarwidget/mostoles-](http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/municipios/mostrarwidget/mostoles-id28092?w=g4p1111111ohmfffffw775z303x4f86d9t95b6e9r1s3n2)

[id28092?w=g4p1111111ohmfffffw775z303x4f86d9t95b6e9r1s3n2](http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/municipios/mostrarwidget/mostoles-id28092?w=g4p1111111ohmfffffw775z303x4f86d9t95b6e9r1s3n2)

- Naveira, Á., & José, A. (2019). *Simulation of vortex shedding and vortex induced vibrations in multibox bridge decks using CFD*. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/23579>
- ODS. (2020). *Operacion Tiempo Real*. <http://ods.org.hn/otr/>
- Ornelas, E. (2008). *La energía eólica*. E Libro. [https://elibro.net/es/ereader/unitechn/28869?as\\_contributor=erik\\_\\_mireles\\_\\_ornelas&as\\_contributor\\_op=unaccent\\_\\_icontains&prev=as](https://elibro.net/es/ereader/unitechn/28869?as_contributor=erik__mireles__ornelas&as_contributor_op=unaccent__icontains&prev=as)
- PV Magazine México. (2020, August 14). *Techos Solares Comunitarios: La democratización en la generación de la energía eléctrica llega a su fin. ASOLMEX*. pv magazine Mexico. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2020/08/14/techos-solares-comunitarios-la-democratizacion-en-la-generacion-de-la-energia-electrica-llega-a-su-fin-asolmex/>
- PVGIS. (2020). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)—European Commission*. PVGIS European Commission. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#TMY](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#TMY)
- Salgado, S., Montoya, L., & Argueta, R. (2018). *Balance Energético Nacional 2018: Energía y Cambio Climático* (p. 102). Secretaría de Energía.
- Sampieri, R., & Collado, C. (2003). *Metodología de la investigación 5ta edición*. McGraw Hill.
- Sanchez, A. (2016). *Evolucion de las instalaciones de energía eólica en España. Actualidad y perspectiva de futuro*. 50.
- SEC. (2020). *Superintendencia de Electricidad y Combustibles*. <https://www.sec.cl/>
- SolidWorks. (2020, August 13). *CAD 3D*. <https://www.solidworks.com/es/category/3d-cad>
- Talayero, A., & Martínez, E. (2020). *Energía eólica*. E Libro. <https://elibro.net/es/ereader/unitechn/44857?prev=bf>
- UMA. (2020). *Estación Meteorológica de la Unidad* [Meteorología].
- Vortex. (2020a). *Vortex Bladeless Wind Power: Overview | LinkedIn*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/company/vortexbladeless/>
- Vortex. (2020b). *Vortex Bladeless—Energía eólica sin palas*. Vortex Bladeless Wind Power. <https://vortexbladeless.com/es/>
- Vortex NANO Datasheet. (2019). *Vortex Bladeless NANO Data Sheet* (p. 2).
- Vortex Tacoma Datasheet. (2019). *Vortex Bladeless Tacoma Data Sheet* (p. 2).

Wind Denmark. (2020). *Viento en el sistema | Viento Dinamarca*. <https://winddenmark.dk/tal-fakta/fakta-om-vind-danmark/vind-systemet>

Yáñez, D. (2015). *An electrical power generator and an electrical generator method* (Patent No. 07802). D. J. Yáñez  
“An electrical power generator and an electrical generator method”, Patent W PCT/ EP2015/072802,  
2015.

Yáñez, D. (2018). *Aerogeneradores resonantes por VIV*. 6.

## XI. ANEXOS



### FALLAS PROPIAS DE DISTRIBUCIÓN, (ENERO-DICIEMBRE) 2019 AREA SAN PEDRO SULA

SUBSTACION	EQUIPO	CAUSA	(ENERO-DICIEMBRE) 2019				NOVIEMBRE 2019				DICIEMBRE 2019		
			APERT	HRS	KWH NE	KWH NR	APERT	HRS	KWH NE	KWH NR	APERT	HRS	KWH NE
SANTA MARTA	L291	LINEA ROTA	1	1.73	6,101.33	6,101.33							
SANTA MARTA	L291	POSTES O TORRES CHOCADAS (NC)	1	2.22	0.00	0.00					1	2.22	0.00
SANTA MARTA	L291	RAMAS SOBRE LA LINEA	1	1.83	8,140.00	8,140.00							
	<b>Total L291</b>		3	5.78	14,241.33	14,241.33	0	0.00	0.00	0.00	2	2.52	0.00
VILLANUEVA	L323	CUCHILLA CC ARQUEADA	1	2.30	30,820.00	30,820.00							
VILLANUEVA	L323	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	1	0.07	760.00	760.00							
VILLANUEVA	L323	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	27	0.87	9,636.33	9,253.00							
VILLANUEVA	L323	FALLA EN RAMAL	2	0.30	3,480.00	3,480.00							
VILLANUEVA	L323	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	2	1.72	12,501.67	12,501.67							
VILLANUEVA	L323	LLUVIASCON DESC. ELECT ATMFE (NC)	1	3.37	26,933.33	26,933.33							
VILLANUEVA	L323	RAMAS SOBRE LA LINEA	1	1.37	11,890.00	0.00							
VILLANUEVA	L323	VIENTOS HURACANADOS (NC)	1	2.12	21,378.34	21,378.34							
	<b>Total L323</b>		36	12.10	117,999.66	105,126.33	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
VILLANUEVA	L324	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	3	0.78	5,983.33	5,983.33					3	0.78	5,983.33
VILLANUEVA	L324	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	5	0.18	2,196.67	2,196.67							
VILLANUEVA	L324	LINEA ROTA	1	4.00	38,400.00	38,400.00							
VILLANUEVA	L324	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	1	0.05	605.00	605.00							
	<b>Total L324</b>		10	5.02	47,185.00	47,185.00	0	0.00	0.00	0.00	3	0.78	5,983.33
VILLANUEVA	L391	ARBOL CAIDO SOBRE LA LINEA	1	3.35	9,380.00	9,380.00							
VILLANUEVA	L391	CAJA CORTACIRCUITO CON FALLA	1	1.55	28,830.00	28,830.00							
VILLANUEVA	L391	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	4	1.78	22,180.00	22,180.00					2	1.55	18,553.33
VILLANUEVA	L391	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	14	0.47	4,843.33	4,843.33	2	0.05	640.00	640.00			
VILLANUEVA	L391	FALLA EN RAMAL	2	3.15	26,845.00	11,900.00							
VILLANUEVA	L391	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	3	15.75	132,421.66	132,421.66							
VILLANUEVA	L391	LLUVIASCON DESC. ELECT ATMFE (NC)	1	0.95	9,500.00	9,500.00							
VILLANUEVA	L391	RAMAS SOBRE LA LINEA	1	0.78	1,645.00	1,645.00					1	0.78	1,645.00
	<b>Total L391</b>		27	27.78	235,644.99	220,699.99	2	0.05	640.00	640.00	3	2.33	20,198.33
VILLANUEVA	L392	ARBOL CAIDO SOBRE LA LINEA	2	4.25	34,873.33	34,873.33							
VILLANUEVA	L392	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	7	0.68	8,696.00	8,696.00							
VILLANUEVA	L392	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	5	0.17	1,638.33	1,638.33					1	0.03	523.33
VILLANUEVA	L392	FALLA EN RAMAL	1	2.20	18,480.00	18,480.00							
VILLANUEVA	L392	PUNTE DANADO (ROTO)	1	3.08	51,800.00	51,800.00							
VILLANUEVA	L392	RAMAS SOBRE LA LINEA	2	1.73	14,477.67	14,477.67							
VILLANUEVA	L392	VIENTOS HURACANADOS (NC)	1	2.02	13,713.33	13,713.33							
	<b>Total L392</b>		19	14.13	143,678.67	143,678.67	0	0.00	0.00	0.00	1	0.03	523.33
VILLANUEVA	L393	ARBOL CAIDO SOBRE LA LINEA	1	3.77	26,743.33	26,743.33							
VILLANUEVA	L393	CAJA CORTACIRCUITO CON FALLA	1	0.07	853.33	853.33							
VILLANUEVA	L393	CUCHILLA CC ARQUEADA	1	9.83	94,400.00	94,400.00							
VILLANUEVA	L393	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	7	0.65	8,361.67	8,361.67							
VILLANUEVA	L393	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	17	0.52	4,836.67	4,836.67					2	0.05	543.33
VILLANUEVA	L393	FALLA EN RAMAL	2	1.27	14,463.33	14,463.33					1	0.08	500.00
VILLANUEVA	L393	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	4	2.92	37,853.33	37,853.33							
VILLANUEVA	L393	RAMAS SOBRE LA LINEA	3	5.07	47,982.00	47,982.00							
VILLANUEVA	L393	VIENTOS HURACANADOS (NC)	1	1.97	21,830.00	21,830.00							
	<b>Total L393</b>		37	26.05	257,323.67	257,323.67	0	0.00	0.00	0.00	3	0.13	1,043.33
VILLANUEVA	L394	ARBOL CAIDO SOBRE LA LINEA	1	4.73	7,573.33	7,573.33							
VILLANUEVA	L394	CAJA CORTACIRCUITO CON FALLA	1	0.45	2,115.00	2,115.00							
VILLANUEVA	L394	CUCHILLA CC ARQUEADA	1	1.50	1,650.00	1,650.00							
VILLANUEVA	L394	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	1	0.02	56.67	56.67							
	<b>Total L394</b>		4	6.70	11,395.00	11,395.00	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	<b>Total general</b>		531	371.32	2,315,026.97	2,160,537.00	25	13.90	56,339.17	56,339.17	37	15.77	60,116.83

### Anexo 1. Informe AOMEN, fallas en el servicio de distribución.



**FALLAS PROPIAS DE DISTRIBUCIÓN, (ENERO-DICIEMBRE) 2019  
AREA NORTE REGIONAL**

SUBESTACION	EQUIPO	CAUSA	ENERO-DICIEMBRE 2019				NOVIEMBRE 2019				DICIEMBRE 2019		
			APERT	HRS	KWH NE	KWH NR	APERT	HRS	KWH NE	KWH NR	APERT	HRS	KWH NE
MORAZAN	1.395	AISLADORES DANADOS (ARQUEADOS)	1	11.98	0.00	0.00							
MORAZAN	1.395	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	1	0.03	43.67	43.67							
MORAZAN	1.395	OBJETOS EN LA LINEA (NC)	1	7.08	0.00	0.00							
MORAZAN	1.395	PRUEBA DE CIERRE POR PERSONAL DE DISTRB.	2	0.18	701.67	701.67							
	<b>Total *1.395</b>		<b>5</b>	<b>19.28</b>	<b>745.33</b>	<b>745.33</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
MORAZAN	1.396	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	3	0.08	298.50	168.50							
MORAZAN	1.396	FALLA EN RAMAL	1	0.03	33.67	33.67							
MORAZAN	1.396	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	1	0.07	290.00	290.00							
MORAZAN	1.396	PRUEBA DE CIERRE POR PERSONAL DE DISTRB.	1	0.02	15.17	15.17							
	<b>Total *1.396</b>		<b>6</b>	<b>0.20</b>	<b>637.33</b>	<b>507.33</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
PROGRESO	1.317	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	3	2.82	14,167.67	14,167.67							
PROGRESO	1.317	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	4	0.13	1,087.33	1,087.33					1	0.03	201.67
PROGRESO	1.317	PUNTE DANADO (ROTO)	1	0.73	7,817.33	7,817.33							
	<b>Total *1.317</b>		<b>8</b>	<b>3.68</b>	<b>23,072.33</b>	<b>23,072.33</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>1</b>	<b>0.03</b>	<b>201.67</b>
PROGRESO	1.318	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	1	0.07	826.67	826.67							
PROGRESO	1.318	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	2	0.10	1,056.00	1,056.00							
PROGRESO	1.318	FALLA EN RAMAL	2	0.42	4,352.50	4,352.50							
PROGRESO	1.318	LINEA ROTA	1	0.90	12,348.00	12,348.00							
PROGRESO	1.318	RAMAS SOBRE LA LINEA	1	1.93	23,432.00	23,432.00							
	<b>Total *1.318</b>		<b>7</b>	<b>3.42</b>	<b>42,015.17</b>	<b>42,015.17</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
PROGRESO	1.319	DESCONOCIDA MAYOR DE 3 MIN.	5	4.05	63,450.34	63,450.34							
PROGRESO	1.319	LLUVIAS EN EL AREA (NC)	1	0.13	1,769.33	1,769.33							
	<b>Total *1.319</b>		<b>6</b>	<b>4.18</b>	<b>65,219.67</b>	<b>65,219.67</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
TERMICA SULZER	1.223	AISLADORES DANADOS (ARQUEADOS)	1	2.22	9,310.00	9,310.00							
TERMICA SULZER	1.223	LINEA SUELTA DE ESTRUCTURA	1	1.30	2,366.00	2,366.00							
	<b>Total *1.223</b>		<b>2</b>	<b>3.52</b>	<b>11,676.00</b>	<b>11,676.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
TERMICA SULZER	1.224	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	2	0.07	377.33	377.33							
	<b>Total *1.224</b>		<b>2</b>	<b>0.07</b>	<b>377.33</b>	<b>377.33</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
TERMICA SULZER	1.226	DESCONOCIDA MENOR DE 3 MINUTOS	1	0.02	47.67	47.67							
TERMICA SULZER	1.226	FALLA EN RAMAL	1	0.75	3,847.50	3,847.50							
	<b>Total *1.226</b>		<b>2</b>	<b>0.77</b>	<b>3,895.17</b>	<b>3,895.17</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	<b>Total general</b>		<b>447</b>	<b>331.85</b>	<b>1,521,877.48</b>	<b>2,162,678.19</b>	<b>24</b>	<b>22.60</b>	<b>67,701.83</b>	<b>67,701.83</b>	<b>29</b>	<b>25.40</b>	<b>73,232.17</b>

**Anexo 2. Informe AOMEN, fallas en el servicio de distribución.**



**Anexo 3. Ilustración del dispositivo Vortex NANO**





**Anexo 4. Ilustración del dispositivo Vortex NANO instalado.**



**Anexo 5. Ilustración del anemómetro de bolsillo.**



**Anexo 7. Ilustración de la estación meteorológica utilizada.**



Anexo 8. Ilustración del monitor de estación meteorológica.



San Pedro Sula, Cortés, Honduras  
22 de junio de 2020.

**Lic. Allan Ramos**  
Alcalde Municipal  
Puerto Cortés

**Estimado Lic. Ramos:**

Reciban un cordial saludo de mi parte.

El presente es para solicitar su apoyo con información referente a datos de viento, magnitud y dirección, ya sea diezminutal u horaria de la zona de Puerto Cortés.

Información que será utilizada con fines académicos, para realizar una investigación en alternativas de aprovechamientos de Recursos Energéticos Primarios, para generación de electricidad.

Dicho proyecto de investigación será desarrollado por el alumno **Orlando José Ordoñez Meoñez** con número de cuenta **21441270** del programa de Ingeniería en Energía.

Agradeciendo de antemano su atención al presente, se despide,



**Ing. Alicia Reyes Duke**  
**Coordinador Académico de Ingeniería Mecatrónica**  
**UNITEC | SPS**  
Correo: [alicia.reyes@unitec.edu.hn](mailto:alicia.reyes@unitec.edu.hn)