INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CAJEME

ANÁLISIS Y REDISEÑO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA

ING. JORGE ALBERTO LÓPEZ GUTIÉRREZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

DR. JOSÉ EFRÉN RUELAS RUÍZ

CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

DR. JUAN JOSÉ DELFÍN VÁZQUEZ

CD. OBREGÓN, SON. JULIO DE 2020

ITESCA Instituto Tecnológico Superior de Cajeme	**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CAJEME** **Dictamen de liberación y aprobación** **F02PSA16.02**

Fecha
20 de Junio del 2020

No. de Registro

Dr. José Efren Ruelas Ruiz.
Coordinador del Programa de la Maestría en *en Ing. En Mecatrónica*
PRESENTE

A través de este documento, me permito comunicarle que el alumno ***Ing. Jorge Alberto López Gutiérrez*** cuyo trabajo de innovación o tesis:

ANÁLISIS Y REDISEÑO DE COMPONENTES ELECTRONICOS DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL

Cumple satisfactoriamente, con los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, por lo que ha sido aceptado para la obtención del grado:

Maestro en Ingeniería en Mecatrónica.

Sin más por el momento, quedo de Usted.

Dr. José Efren Ruelas Ruiz — 20 de Junio del 2020

Nombre y Firma del Director de Tesis — **Fecha**
Director de Tesis

DICTAMEN DE ACEPTACION - COMISIÓN REVISORA

PRESIDENTE	Dr. Jose Efren Ruelas Ruiz		20 de Jun de 2020
	Nombre	**Firma**	**Fecha**
MIEMBRO 1	Dr. Juan Jose Delfin Vasquez		20 de Jun de 2020
	Nombre	**Firma**	**Fecha**
MIEMBRO 2	Dr. Baldomero Lucero Velazquez		20 de Jun de 2020
	Nombre	**Firma**	**Fecha**

DEDICATORIA

A mis padres: Que son mi más grande ejemplo, que con su apoyo y comprensión he logrado lo que hoy tengo.

A mi esposa: Que siempre ha sido mi apoyo y mi motivo para seguir adelante.

A mi director: Por la paciencia, apoyo y dedicación en este proyecto, así como la confianza y enseñanza que me ha brindado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios: Por llenarme de dones para salir adelante y permitirme culminar esta etapa en mi vida.

A mis padres: Por su ayuda incansable, por darme toda su confianza, por estar apoyandome en todo momento, por hacer siempre el mayor esfuerzo para cuidar mi bienestar, por su cariño y por ser mi inspiración.

A mi esposa: Por apoyarme en todo momento, por ser una motivación para superarme, por su disposición para ayudarme con sus sugerencias y consejos.

A mi director: Dr. José Efren Ruelas Ruiz, por brindarme su apoyo y sabiduría para la realización de este proyecto, por la gran paciencia que ha tenido para que este se lleve a cabo.

A mi compañero de tesis: Ing. Oscar Leonardo López Morales, por su apoyo y confianza durante el proceso de este proyecto.

RESUMEN

Este trabajo de tesis es multidisciplinario ya que involucra conocimiento del área mecánica, eléctrica, electrónica y computación. La generación de energía eléctrica en el mundo cada día crece mas debido a la gran demanda de esta por los usuarios, en algunas ocasiones se presentan condiciones en las que la energía eléctrica no puede llegar a los puntos que se encuentran alejados de la red eléctrica. Este trabajo de tesis aborda el rediseño de una Aerogenerador (AG) de eje horizontal, el análisis de este y la implementación, con lo que respecta al rediseño se hacen mejoras a las palas de este con la finalidad de proteger al AG de ambientes agresivos (corrosión y salinidad) con el propósito de ser implementado en una zona costera donde no se cuenta con servicio de la red eléctrica. Además, se diseña una torre de montaje para este. Para el diseño de la torre se aplican los conocimientos de la mecánica de sólidos y diseño mecánico. En el presente trabajo diseñó un convertidor de cc a cc (corriente continua a corriente continua) elevador para conectar un aerogenerador que proporciona un voltaje nominal de 12 volts con un sistema almacenamiento de 24 volts. Como el voltaje del aergenerador no siempre se mantiene en su valor nominal fue necesario hacer un control en la conmutación del switch (transistor) para manipular el factor de elevación y así tener el voltaje necesario para acoplar el aerogenerador con el sistema que en este caso es de 24 volts ya mencionados.

ABSTRACT

This thesis work is multidisciplinary since it involves knowledge of the mechanical, electrical, electronic and computing areas. The generation of electrical energy in the world grows more and more every day due to the great demand of this by the users, in some occasions there are conditions in which the electrical energy cannot reach the points that are far from the electrical network. This thesis work addresses the redesign of a horizontal axis Wind Turbine (WT), its analysis and implementation, with respect to the redesign, improvements are made to the blades of this in order to protect the WT from aggressive environments (corrosion and salinity) in order to be implemented in a coastal area where there is no service from the electricity grid. In addition, a mounting tower is designed for it. Knowledge of solids mechanics and mechanical design are applied to tower design. The present work designed an elevator DC to DC (direct current to direct current) converter to connect a wind turbine that provides a nominal voltage of 12 volts with a 24 volt storage system. As the wind turbine voltage is not always maintained at its nominal value, it was necessary to control the switch (transistor) to manipulate the elevation factor and thus have the necessary voltage to couple the wind turbine with the system that in this case is 24 volts already mentioned.

ÍNDICE

1.. Introducción 19
1.1. Antecedentes 20
1.2. Plantemiento del problema 23
1.3. Justificación 24
1.4. Objetivos 25
1.4.1. Objetivo general 25
1.4.2. Objetivos específicos 25
1.5. Alcances y limitaciones 26
1.5.1. Alcances 26
1.5.2. Limitaciones 26

2.. Marco teórico o marco conceptual 28
2.1. Energía eólica 28
2.2. Aerogeneradores 29
2.2.1. Tipos de aerogeneradores 29
2.3. Ventajas de cada tipo de aerogeneradores 30
2.4. Partes de un aerogenerador de eje horizontal 30
2.5. Diseño CAD 33
2.6. El viento 33
2.6.1. México como productor de energía eólica 34
2.6.2. Aprovechamiento del viento 36
2.7. Teorema de Betz 37
2.8. Generación eléctrica 38

2.9. Teorema del elemento pala 40
2.9.1. Características del perfil aerodinámico 40
2.10. Fibra de vidrio 42
2.10.1. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio 46
2.10.2. Estudios de corrosión en fibra de vidrio 47
2.10.3. Susceptibilidad de las fibras de vidrio a la corrosión 48
2.11. Método del elemento finito 50
2.11.1. Principios del método del elemento finito 52
2.11.2. Matriz de rigidez 53
2.12. Materiales compuestos 56
2.12.1. Interface 58
2.12.2. Teoría clásica de láminas 59
2.12.3. Campos de estudio de los materiales compuestos 59
2.12.4. Componentes de los materiales compuestos 60
2.13. Extensometría eléctrica de resistencia variable 62
2.13.1. Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable 63
2.13.2. Extensómetro eléctrico de resistencia variable (strain gage) 63
2.13.3. Probador de instalación de extensómetros (Gage Intalation Tester 1300) . 64
2.13.4. Puente de Wheatstone 65
2.14. Strain Gage 67
2.14.1. Principio de funcionamiento 68
2.14.2. Caracteristicas 70
2.15. Teoría de elasticidad lineal 72
2.15.1. Modelo de esfuerzos 72
2.15.2. Tensor de esfuerzos 73
2.15.3. Relación de Poisson 76
2.15.4. Ecuaciones difirenciales de equilibrio 77
2.15.5. Modelo de deformación 79

2.15.6. Modelo deformación-esfuerzo 81
2.15.7. Modelo constitutivo de la teoría de elasticidad 83
2.15.8. Deformación térmica 84
2.16. Teoría de láminas 86
2.17. Diagrama de esfuerzo-deformación 87
2.18. Torre del aerogenerador 89
2.19. Fuerzas que intervienen en un aerogenerador 91
2.19.1. Fuerza del viento sobre el rotor 92
2.19.2. Fuerza del viento sobre la torre del AG 93
2.20. Esfuerzos en vigas 94
2.20.1. Esfuerzos normales en vigas a flexión 95
2.21. Transformaciones de esfuerzo 97
2.21.1. Círculo de Mohr del esfuerzo plano 97
2.22. Límite de resistencia a la fatiga 101
2.23. Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga 101
2.24. Control de potencia 105
2.25. Diseño de control 106
2.26. Zonas de operación de aerogeneradores 106
2.27. La influencia de la velocidad del aire 107
2.28. Baterías 107
2.28.1. Tipos de baterías 108
2.29. Leyes de Kirchhoff 110
2.29.1. Ley de corrientes de Kirchhoff 110
2.29.2. Ley de voltajes de Kirchhoff 111
2.30. Capacitores 112
2.31. Inductores 113
2.32. Semiconductores 114
2.33. Transistores 116

2.33.1. Transistores bipolares de juntura (BJT) . . . 116
2.33.2. Transistor MOSFET . . . 117
2.34. Convertidores de CC-CC . . . 118
2.35. Reguladores lineales de tensión . . . 119
2.36. Convertidor conmutado básico . . . 119
2.36.1. Tipos de convertidores . . . 119
2.36.2. El convertidor Reductor . . . 119
2.36.3. El convertidor Elevador . . . 121

3.. Desarrollo . . . 123
3.1. Determinación de parámetros: Potencia eléctrica, velocidad del aire, ambiente y voltaje. . . . 124
3.2. Selección del AG . . . 126
3.3. Caracterización del AG seleccionado . . . 128
3.4. Selección de componentes para mejora del AG . . . 129
3.5. Construción de probetas para estudio de propiedades mecánicas . . . 137
3.6. Instrumentación de probetas y prueba de instalación de extensómetros . . . 139
3.6.1. Proceso para soldar los conductores a la galga extensométrica . . . 145
3.6.2. Pruebas de resistencia a galgas extensométricas instaladas en probetas . 147
3.6.3. Recomendaciones para las pruebas . . . 147
3.6.4. Procedimiento para la prueba de extensómetros . . . 148
3.6.5. Recubrimientos de protección de la galga extensométrica . . . 150
3.7. Diseño de la base para montaje del AG . . . 151
3.8. Etapa de conversión de CD . . . 158

4.. Resultados . . . 162
4.1. Análisis de elemento finito en compenentes seleccionados para mejora . . . 166
4.2. Etapa de conversión de CD . . . 173

5.. Conclusiones y recomendaciones 185

5.1. Conclusiones 185

5.2. Trabajos futuros 188

Referencias bibliográficas 189

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Aerogeneradores de eje horizontal. 20
1.2. Ubicación del ejido Cuauhtemoctzin. 20
1.3. Proceso de generación de energía eólica. 22
1.4. Cuauhtemoctzin Tabasco. 24

2.1. Aerogenerador de eje horizontal. 29
2.2. Aerogenerador de eje vertical completo. 30
2.3. Partes de un aerogenerador de eje horizontal. 31
2.4. Distribución de energía en México; fuente: https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2018. 36
2.5. Distribución de energía en México para el año 2020/2022; fuente https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2020. 36
2.6. Ley de Betz 38
2.7. Generador eléctrico 39
2.8. Corte transversal de una pala.[1] 40
2.9. Carácteristicas de un perfil aerodinámico.[1] 40
2.10. Partes del perfil de una pala 41
2.11. Fibra de vidrio 43
2.12. Representación esquemática del molde de sujeción de fibras para ensayo de tensión de fibras individuales.[2] 46
2.13. Relación resistencia - densidad obtenida de ensayos de tensión en fibras de vidrio y de queratina.[2] 47
2.14. Descripción de las aplicaciones de tipo de vidrio y susceptibilidad al ataque ácido.[3] 49

2.15. Discretización con elemento finito de una barra. 52
2.16. Discretización con elementos triangulares. 53
2.17. Placa mallada para análisis de elemento finito. 54
2.18. Representación de la placa en conjunto de resortes. 55
2.19. Compuestos ordenados por tipo de refuerzo. 57
2.20. Materiales compuestos laminados (MCL). 58
2.21. Compuesto laminado metálico simétrico con capas isótropicas. 58
2.22. Clasificación de los materiales compuestos. 60
2.23. Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable.[33] 63
2.24. Principio del funcionamiento del puente de Wheatstone.[5] 65
2.25. Puente de Wheatstone.[5] 66
2.26. Galga extensométrica.[6] 67
2.27. Esfuerzo de poisson.[6] 68
2.28. Diagrama de esfuerzo-deformación. 69
2.29. Parámetros de una galga impresa. 71
2.30. Cuerpo seleccionado: (a) cuerpo libre con algunas fuerzas internas, (b) vista simplificada con componentes de ΔP.[7] 73
2.31. (a) Estado general de esfuerzo actuando sobre un elemento infinitesimal en el sistema coordenado inicial. (b) Estado general de esfuerzo actuando sobre un elemento inifinitesimal definido en un sistema girado de ejes coordenados. Todos los esfuerzos tienen sentido positivo.[7] 74
2.32. Diagrama de cuerpo libre del cubo centrado en el punto Q[8] 75
2.33. proyección sobre el plano $x'y'$[8] 76
2.34. Esfuerzos en una barra cargada axialmente.[8] 77
2.35. Elemento infinitesimal con esfuerzos y fuerzas de cuerpo.[7] 78
2.36. Estado de esfuerzo para cargas multiaxiales.[8] 81
2.37. Estado de esfuerzo para cargas multiaxiales.[8] 82
2.38. Elongación de una varilla debido al incremento de temperatura..[8] 85

2.39. Probeta de tracción normalizada con sección recta circular.[9] 88
2.40. Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos.[10] 89
2.41. Principales fuerzas que intervienen en un AG. 91
2.42. Coeficiente de empuje en función de λ. 93
2.43. Coeficiente de forma. 93
2.44. Viga recta en flexión positiva.[11] 96
2.45. Esfuerzo del flexión.[11] 96
2.46. Formulas de esfuerzo cortante máximo debido a flexión.[11] 97
2.47. Estado general de esfuerzo en un punto Q [8] 97
2.48. Estado general de esfuerzo plano en un punto Q [8] 98
2.49. Circulo de Mohr [8] 98
2.50. Relaciones de transformación de esfuerzo [8] 99
2.51. Esfuerzos principales [8] 100
2.52. Esfuerzo cortante máximo [8] 101
2.53. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin [11] 103
2.54. Factor de temperatura [11] 104
2.55. Factores de confiabilidad K_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga [11] 105
2.56. Zonas de operación en aerogeneradores 107
2.57. Variación (%) de la potencia eólica debido a la temperatura y la presión atmosférica. 108
2.58. Nodo que ilustra la aplicación de la ley de corrientes de Kirchhoff. 110
2.59. La diferencia de potencial entre los puntos A y B es independiente de la trayectoria elegida. 111
2.60. Capacitor usual. 112
2.61. Capacitor usual. 112
2.62. Símbolo eléctrico y convenciones de corriente-tensión de un capacitor. 113
2.63. Forma habitual de un inductor. 113
2.64. Símbolo eléctrico y convenciones de corriente-tensión de un inductor. 114

2.65. Unión de materiales y símbolo del diodo. 115
2.66. Características v–i del diodo. 115
2.67. Transistores bipolares. 116
2.68. Curvas características del transistor bipolar. 117
2.69. Operación básica de un BJT. 117
2.70. MOSFET tipo agotamiento. 118
2.71. MOSFET tipo agotamiento. 119
2.72. Convertidor conmutado. 120
2.73. Convertidor reductor. 120
2.74. Convertidor elevador. 121

3.1. Metodología para el desarrollo de tesis. 123
3.2. Area de barrido del rotor y volumen de aíre 125
3.3. Palas a implementar 126
3.4. Generador eléctrico a implementar. 127
3.5. Controlador de carga a implementar 128
3.6. Medición de voltaje. 129
3.7. Grafica de voltaje vs rpm. 130
3.8. Modelado del hub en Solidworks 2018. 130
3.9. Modelado de la pala en Solidworks 2018. 131
3.10. Resina Mérida. 131
3.11. Aplicación de fibra de vidrio a un pieza de PVC. 131
3.12. Aplicación de fibra de vidrio al plastico. 132
3.13. Acabado de la fibra con distintas cantidades de secante. 132
3.14. Pala puesta sobre fibra de vidrio para dibujar su contorno. 133
3.15. Recorte del forro de la pala. 133
3.16. Aplicación del forro de fibra de vidrio a la pala. 134
3.17. Apliación de la fibra de vidrio. 134
3.18. Temperatura de la resina en la apliación de la fibra de vidrio. 134

3.19. Temperatura de la resina en la apliación de la fibra de vidrio. 135
3.20. Palas terminadas de un solo lado. 135
3.21. Pala terminada de ambos lados. 135
3.22. Pala terminada. 136
3.23. Pala terminada. 136
3.24. Hub terminado. 136
3.25. Construcción de probetas 137
3.26. Pulido de las probetas de PVC 138
3.27. Pulido de las probetas de PVC 138
3.28. Apliación de la resina a las probetas 138
3.29. Probeta de PVC y fibra de vidrio 139
3.30. Probeta de PVC y fibra de vidrio 139
3.31. Proceso de limpieza[33] 140
3.32. Limpieza con gasas[33] 140
3.33. Limpieza con bastoncillo y neutralizador[33] 141
3.34. Limpieza con bastoncillo y neutralizador[33] 141
3.35. Levantado de cinta a un ángulo menor de 45 grados[33] 142
3.36. Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[33] 142
3.37. Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[33] 142
3.38. Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[4] 143
3.39. Forma correcta de la aplicación de adhesivo M-Bond 200[33] 144
3.40. Presión para obtener capa uniforme de adhesivo 144
3.41. Presión con el dedo pulgar sobre la galga y las terminales[33] 144
3.42. Presión con el dedo pulgar sobre la galga y las terminales[33] 145
3.43. Tipo de punta de cautín[33] 146
3.44. Montículo[33] 146
3.45. Montículo[4] 146
3.46. Colocación del cautín a 30^o para soldar conductores en galgas[33] 147

3.47. Gage Instalation Tester Model 1300 de VISHAY, Micro-Measurement 148
3.48. Recubrimiento Poliuretane Coating M-COAT A 151
3.49. Viga en voladizo con carga uniforme.[11] 153
3.50. Diagrama de fuerza cortante.[11] 154
3.51. Diagrama de momento flector.[11] 154
3.52. Estado de esfuerzo plano 155
3.53. Modelo en Solidworks de la torre propuesta 156
3.54. Diagrama de fuerza cortante en Solidworks 156
3.55. Diagrama de momento flector en Solidworks 156
3.56. Desplazamiento de la torre en Solidworks 157
3.57. Simulación de esfuerzo axial de la torre en Solidworks 157
3.58. Simulación de deformación de la torre en Solidworks 157
3.59. Circuito resultante en proteus. 159
3.60. Tarjeta controladora conectada al elevador. 160
3.61. Programa en IDE de Arduino. 161

4.1. Palas y hub terminados 162
4.2. Circulo de Morh 164
4.3. Díagrama esfuerzo-deformación del acero 1020 165
4.4. AG montado en la base diseñada y fabricada 165
4.5. Base de la torre 165
4.6. Base para el montaje del AG 166
4.7. Área de captación de la pala del AG 166
4.8. Fuerza ejercida en una cara de la pala del AG 167
4.9. Aplicación de la fuerza ejercida en Solidworks 167
4.10. Sujeción de la pala en Solidworks 167
4.11. Mallado de la pala en Solidworks 168
4.12. Esfuerzo de Von Mises en la pala de PVC 168
4.13. Desplazamiento de la pala 169

4.14. Creación de un nuevo material en Solidworks 169
4.15. Esfuerzo de Von Mises en pala de fibra de vidrio 170
4.16. Desplazamiento en pala de fibra de vidrio 170
4.17. Esfuerzo de Von Misis en hub de fibra de vidrio 171
4.18. Desplazamiento del hub de fibra de vidrio 172
4.19. Esfuerzo de Von Mises en hub de PVC 172
4.20. Desplazamiento en hub de PVC 172
4.21. Circuito en simulador. 173
4.22. Gráfica D contra V_o. 174
4.23. Voltaje de entrada contra el de salida 174
4.24. Circuito elevador en protoboard. 175
4.25. Programa para el PWM. 176
4.26. Medición de la entrada (5.2 V) 176
4.27. Medición de la salida (23.8 V). 177
4.28. Grafica % del ciclo de trabajo contra voltaje. 177
4.29. 7 Circuito elevador con resistencia de 100 Ω de 5 W. 178
4.30. Grafica % del ciclo de trabajo contra voltaje 179
4.31. Circuito completo con el elevador de voltaje, tarjeta controladora y sensor de voltaje. 179
4.32. Diagrama del prototipo final. 180
4.33. Dispositivo elevador controlado por una tarjeta electronica terminado. 180
4.34. Carcasa contenedora del prototipo. 181
4.35. Terminales de entrada y de salida. 181
4.36. Programa final. 182
4.37. Instalación del aerogenerador 183
4.38. Media de velocidad del viento según windfinder. 183
4.39. Mediciones de voltaje del aerogenerador. 184

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Propiedades de la fibra de vidrio 47

3.1. Consumo estimado de la vivienda 124
3.2. Voltaje y rpm medidos 129
3.3. Cantidad de resina y secante aplicado 133
3.4. Probetas construidas 137
3.5. Convertidor 158

4.1. Ciclo de trabajo contra voltaje de salida (V_o). 173
4.2. Voltaje de entrada contra voltaje de salida con 50 % del ciclo de trabajo 174
4.3. Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada. 175
4.4. Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada. 178
4.5. Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada 184

1. INTRODUCCIÓN

El interés por todas las fuentes de energía alternativas ha crecido en los últimos años y en especial las basadas en la energía producida por el viento. La potencia instalada ha supuesto un incremento notable en países como Estados Unidos, Alemania o España. Este desarrollo se ha venido dando de forma sostenida, motivado principalmente por el desarrollo de generadores eléctricos libres de emisiones de carbón. [12]

La generación de energía eléctrica en la actualidad tiene un papel muy importante, ya que se emplea para iluminar una vivienda hasta energizar sistemas eléctricos de gran escala. Debido a la demanda de energía eléctrica requerida por las personas, se recurre a diferentes métodos para la generación de energía, uno de ellos es la generación de energía eléctrica mediante Aerogeneradores, el cual es un dispositivo que permite la generación de energía eléctrica mediante el viento, convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica. En la Figura 1.1, se muestra un aerogenerador de eje vertical. Algunas ventajas de la generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores son: es una energía limpia y renovable, lo cual ayuda en la reducción del consumo de combustibles fósiles. Desarrollar tecnologías amigables con el medio ambiente es de vital importancia por la gran cantidad de problemas ambientales a los que se enfrenta la humanidad como el calentamiento global, sobreexplotación de los recursos naturales, entre otros; los cuales afectan a nuestro planeta.

En esta tesis se tomara como referencia la localidad de Cuauhtemoctzin, se localiza a dos horas aproximadamente de la cabecera municipal del municipio de Cárdenas Tabasco, el pueblo más cercano Villa Benito Juárez el cual esta aproximadamente a 20 kilómetros de distancia, colinda con el rio Tonalá, el cual divide a los Estados de Veracruz y Tabasco (ver Figura 1.2), la principal



Fig. 1.1: Aerogeneradores de eje horizontal.

fuente empleo es la pesca y venta de mariscos, la cual los últimos años se ha visto afectada debido a la contaminación del agua, aire y tierra.

Esta localidad no cuenta con los servicios de agua potable, seguridad, drenaje, servicios médicos y suministro de energía eléctrica. Además, se encuentra en una zona donde se pueden aprovechar los vientos.



Fig. 1.2: Ubicación del ejido Cuauhtemoctzin.

1.1 Antecedentes

La energía eólica representa actualmente, una de las alternativas más viables para la generación eléctrica con energía renovable. La transición de molinos de viento que suministran energía mecánica a turbinas eólicas generadoras de electricidad, comenzó alrededor del año 1900 en los Estados Unidos y Dinamarca. En 1930 se analizó su conexión a la red eléctrica, sin embargo, con

la aparición de los radios de transistores de escaso consumo de energía mediante el uso de pilas, se enfoco la aplicación de los aerogeneradores a la carga de baterías de vehículos de campo. [13]

A partir de 1973 resurgio la energia eolica en Europa y en Estados Unidos, debido a la disminucion de los hidrocarburos, al incremento en la demanda emergetica y a la preocupacion para la reduction de la creciente contamination ambiental. Con el avance de la electronica de potencia en las ultimas tres decadas, la tecnologia para convertir la energia del viento en electricidad ha avanzado significativamente en eficiencia, costo y confiabilidadEste tipo de generacion es hoy en dia la de mayor penetration en el mercado de las energias removables, con tasas de crecimiento anual supehores al 35 %, de acuerdo con information del Consejo Eolico Mundial (GWEC por su siglas en ingles). [13]

La energía eólica ha sido utilizada tradicionalmente como fuerza motriz de los buques de vela y para impulsar los molinos de viento. El uso de este tipo de energía fue cayendo en desuso con la difusión de la electricidad y con la amplia disponibilidad y el bajo coste de los motores alimentados con combustibles fósiles. No obstante, la atención prestada recientemente al cambio climático, la necesidad de incrementar la cuota de energía limpia y el temor ante una menor disponibilidad del petróleo en el futuro han renovado el interés en la producción de energía de fuentes renovables y, por tanto, también de la eólica. Este tipo de energía, a diferencia de otras energías renovables, exige inversiones menores y utiliza un recurso natural disponible habitualmente en todas partes y especialmente aprovechable en las zonas templadas, donde se encuentran la mayoría de las naciones desarrolladas industrialmente. Durante la última década del siglo XX se construyeron y probaron diferentes modelos de aerogeneradores: con rotor de eje vertical y horizontal, con número variable de palas, con el de rotor situado a barlovento o a sotavento de la torre, etc. Una turbina de eje horizontal con rotor de tres palas a barlovento ha demostrado ser la tipología en general más adecuada y, en consecuencia, ha tenido un notable desarrollo caracterizado tanto por un rápido aumento de sus dimensiones y potencia como por una amplia difusión. [14]

En la actualidad, la producción de electricidad mediante Energía Eólica ha alcanzado un nivel de madurez tecnológica que la hace viable técnica y económicamente, con costos de producción muy atractivos para el mercado eléctrico mundial en sitios previamente explorados y cuantificados. Por ello, en el mundo se han diseñado diversos tipos de Aerogeneradores (AG) que aprovechan la energía cinética de los flujos de viento, con una amplia variedad de tamaños, modelos, y diseños.

La mayor parte de la tecnología desarrollada en el área de la energía eólica se enfoca al diseño y operación de AG grandes. Miles de estas turbinas funcionan alrededor del mundo y proveen energía eléctrica a cientos de hogares.

El proceso que se lleva a cabo para la conversión de la energia eólica en Energía Eléctrica, se representa en el diagrama de bloques de la Figura 1.3.

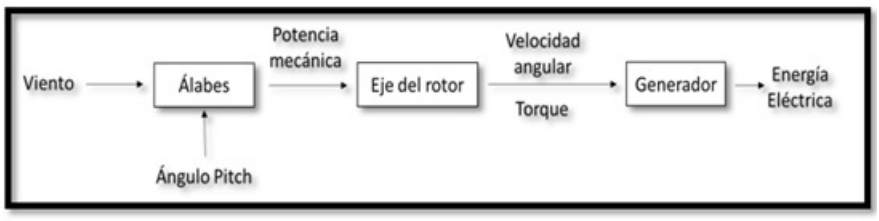


Fig. 1.3: Proceso de generación de energía eólica.

Es común el uso de controladores de carga (sistemas electrónicos) para regular la potencia trifásica de salida del aerogenerador, desviando a una resistencia en derivación (conocida como carga Dummy) la potencia generada que resulte en exceso, para disiparla en forma de calor, cuya intención principal es frenar la turbina y limitar su potencia de salida, manteniéndola dentro de los límites permitidos de operación nominal definidos por cada fabricante o por especificaciones de la carga o de la red a la que está conectada. La potencia disponible en un flujo de aire es función del cubo de la velocidad promedio del viento, por lo que al existir fuertes ráfagas o perturbaciones, se produce una potencia mecánica que puede fácilmente superar a la de diseño en

el eje del generador del aerogenerador (AG), lo cual hace conducir grandes corrientes eléctricas a través de los devanados, superiores a las de diseño.

Aunque esta potencia se derivada por el controlador de carga mediante la conexión momentánea a la resistencia derribadora (Dummy), si los vientos son fuertes y sostenidos, los devanados del generador sufren un incremento de su temperatura por efecto Joule debido al sobre paso de corrientes mayores a las nominales, dañando como consecuencia al generador y poniéndolo fuera de servicio eventualmente. Una técnica usada para controlar la potencia mecánica generada por la turbina es denominada "Furling", mediante la cual el giro de la góndola o eje del rotor alrededor del eje de la torre o soporte de la turbina, se pueden reducir las fuerzas aerodinámicas generadas por las corrientes de viento.

En esta tesis se aplicará fibra de vidrio a las palas de AG con recubrimiento especial para la protección de corrosión, además de fabricar tres probetas para ensayos mecánicos con la técnica de Srange Gange para determinar las propiedades de dos materiales compuestos. Se aplicará fibra de vidrio en el AG, debido a que la zona donde será empleado este, es una zona costera, en donde la presencia de corrosión y salitre son muy elevadas.

1.2 Plantemiento del problema

En el ejido Cuauhtemoctzin (véase Figura 1.4) no se cuenta con energía eléctrica, y debido a que, por los escasos de recursos económicos de los pobladores, no se tiene contemplado ninguna red de suministro a corto plazo, por lo que, se requiere aprovechar el recurso aire, para generar dicha energía. El problema que se pretende resolver es el siguiente:

Se requiere rediseñar un AG de eje horizontal de 500 Watts con la finalidad mejorarlo para que este soporte ambientes corrosivos y salinos.



Fig. 1.4: Cuauhtemoctzin Tabasco.

En la generación de energía es común el uso de sistemas de 12 volts, pero con configuraciones de conexión serie y/o paralelo se pueden tener sistemas de mayor voltaje, de esto se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo conectar un aerogenerador con generación nominal de 12 volts a un sistema de 24 volts?

¿Cómo mantener el voltaje de generación aunque bajen las revoluciones provocadas por la disminución de la velocidad del viento?

1.3 Justificación

Considerando la problemática del suministro de energía eléctrica en la localidad de Cuauhtemoctzin, la cual está ubicada en el municipio de Cárdenas, en el Estado de Tabasco, se implementará un aerogenerador de eje horizontal, para generar en energía eléctrica limpia en los hogares de dicha localidad, dicho mini aerogenerador tendrá la capacidad de abastecer a una vivienda piloto, con una demanda máxima de 500 Watts.

Debido a la existencia de sistemas conectados para proporcionar mayor voltaje al de un aerogenerador común de12 volts y que a bajas velocidades del viento produce menos voltaje al requerido por las baterías, es necesario diseñar un circuito el cual eleve el voltaje y lo mantenga

en el voltaje necesario (24 volts en este proyecto) para que sea compatible con el sistema al que se conectará.

1.4 Objetivos

Los objetivos de este trabajo de tesis son los siguientes:

1.4.1 Objetivo general

Analizar, rediseñar e implementar, un aerogenerador (AG) de eje horizontal para ser utilizado en zonas de muy altas condiciones humedad y corrosión.

1.4.2 Objetivos específicos

a) Seleccionar un aerogenerador eléctrico de eje horizontal para cubrir la demanda de energía eléctrica deseada (500 Watts).

b) Realizar pruebas pertinentes de funcionamiento del aerogenerador.

c) Analizar y determinar componentes a mejorar del aerogenerador seleccionado.

d) Aplicar fibra de vidrio como recubrimiento a las palas del aerogenerador, con la finalidad de proteger a las palas de la salinidad y corrosión.

e) Diseñar y fabricar la estructura de montaje para el aerogenerador.

f) Aplicar análisis de elemento finito a la torre del AG.

g) Construir tres probetas de materiales compuestos laminados simétricos, teniendo como compuestos: Fibra de vidrio- Policloruro de Vinilo (PVC)-Fibra de vidrio, Fibra de vidrio-Policloruro de Vinilo PVC-Fibra de vidrio y pintura anticorrosiva, y PVC.

h) Aplicar pintura anticorrosiva con la finalidad de protegar las palas y hub del AG.

i) Conectar un aerogenerador con generación de 12 volts a un sistema de 24 volts mediante un convertidor de corriente continua para acoplarlo a las baterías.

j) Diseñar un circuito que eleve el voltaje al requerido por el sistema al que se conectará.

k) Construir un circuito elevador de voltaje.

1.5 Alcances y limitaciones

Los alcances y limitaciones se enlistan a continuación:

1.5.1 Alcances

a) El AG es de un potencia máxima de 500 watts.

b) El AG es de eje horizontal.

c) Análisis y mejora de componentes.

d) Modelado en Solidworks de componentes.

e) Ensamble y montaje de componentes.

f) Prueba del aerogenerador.

g) Generar una potencia aproximada de 500 Watts de energía eléctrica.

h) El circuito deberá recibir un voltaje entre 6 y 12 volts y elevarlo a 24 volts.

i) Deberá funcionar hasta la generación nominal del aerogenerador.

1.5.2 Limitaciones

a) Se emplearán materiales ligeros y resistentes a la corrosión.

b) Los recursos con los que se cuenta para la fabricación del prototipo no son suficientes para fabricar uno de mayor potencia.

c) El tiempo máximo para desarrollo para esta tesis es de dos años, por lo cual esta delimitado a implementación, análisis y mejora.

d) Se utilizará extensometría eléctrica de resistencia variable (strain gage)

e) Se considera una temperatura homogénea para la realización de las pruebas de tensión.

f) El laminado compuesto está constituido por capas homogéneas.

g) La unión entre las capas es perfecta y los desplazamientos y deformaciones son continuos a través de la interface.

h) Los compuestos y probetas individuales son laminados y construidos a base de fibra de vidrio y PVC.

i) La implementación y prueba del AG se limita a ser realizada en Cd. Obregón, Sonora.

j) No se aplicarán pruebas de corrosión en los componentes seleccionados para mejora.

2. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL

2.1 Energía eólica

Energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. [15]

El aprovechamiento de la energía eólica muy atractivo, ya que es una fuente inagotable de energía, tiene muchas ventajas y desventajas; las cuales se enlistan a continuación:

Ventajas:

a) La energía eólica no contamina y evita el consumo de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático.

b) Es una fuente de energía económica.

c) Evita la contaminación que conlleva el trasporte de los combustibles; gas, petróleo, gasolina y carbón. Se reduce el tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales.

d) La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de litros de petróleo y miles de kilogramos de lignito negreo en las centrales térmicas.

Desventajas:

a) El viento es aleatorio y variable, tanto en velocidad como en dirección.

b) La instalación de aerogeneradores tienen impacto ambiental en la fauna, sobre todo en las aves.

c) Requieren flujo de viento constante para un buen desempeño.

2.2 Aerogeneradores

Un aerogenerador es una máquina formada principalmente por una turbina eólica y un generador eléctrico. La turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es transformada en energía eléctrica por el generador. Existen dos tipos de aerogeneradores según su eje de rotación: horizontal y vertical. Por motivos de eficiencia y mayor rendimiento, el tipo de aerogenerador más utilizado en la actualidad es el aerogenerador de eje horizontal, en el cual, el eje de rotación se encuentra paralelo al suelo. Este tipo de aerogeneradores tienen su eje de rotación principal en la parte superior de una torre y necesitan un mecanismo de orientación para hacer frente a los cambios bruscos en la dirección del viento.[13]

2.2.1 Tipos de aerogeneradores

De acuerdo a la orientación del eje, los aerogeneradores se clasifican en: aerogeneradores de eje horizontal (véase Figura 2.1) y aerogeneradores de eje vertical.



Fig. 2.1: Aerogenerador de eje horizontal.

El aerogenerador de eje vertical completo se muestra en la Figura 2.2, Los aerogeneradores constan de ciertos componentes, los cuales hacen posible su funcionamiento. En la siguiente sección se muestran los componentes de un aerogenerador de eje horizontal.



Fig. 2.2: Aerogenerador de eje vertical completo.

2.3 Ventajas de cada tipo de aerogeneradores

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical son:

a) No necesitan sistemas de orientación.

b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.

c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.[16]

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal son:

a) Mayor rendimiento.

b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).

c) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.[16]

2.4 Partes de un aerogenerador de eje horizontal

En la Figura 2.3 se muestran los componenetes principales de un aerogenerador de eje horizontal: Los componentes principales son:

1) Góndola: Su función principal es proteger y contener todos los componentes del aerogenerador, evitando fallas y presencia de corrosión en los componentes.

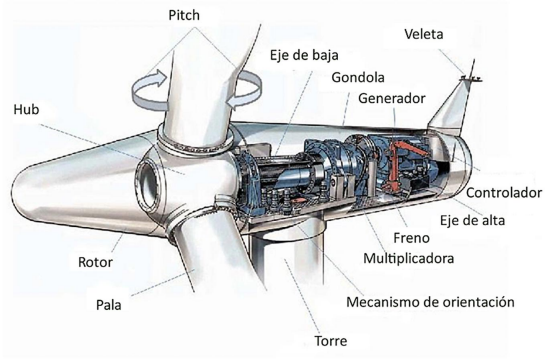


Fig. 2.3: Partes de un aerogenerador de eje horizontal.

2) Palas: Es un elemento muy importante que debe satisfacer varios objetivos. Por un lado maximizar la energía capturada del viento para la distribución de la velocidad del viento especificada y por otro reducir la fatiga a la que se le somete. Debe de estar diseñado para resistir cargas extremas y evitar resonancias y deflexiones que provoquen colisiones con la propia torre. [17]

   Las palas son los elementos del aerogenerador que capturan la energía cinética del viento. Todas las palas del aerogenerador se unen de forma solidaria a un soporte denominado buje o cubo.[18]

3) Hub: Es el elemento que soporta a las palas del aerogenerador con el eje de baja velocidad, el buje se encarga de transmitir movimiento de las palas al eje.

4) Ejes: Su función principal es transmitir movimiento, el eje de baja velocidad se conecta a las palas mediante el hub, y el eje de alta velocidad se conecta al generador; la velocidad del eje de baja velocidad se transmite al eje de alta velocidad mediante un tren de engranajes lo cual permite aumentar la velocidad; es importante mencionar que el eje de alta velocidad está equipado con un freno mecánico.

5) Freno: Es el encargado de evitar que el eje de alta velocidad, gire a revoluciones muy altas, lo cual puede afectar al generador.

6) Veleta: La veleta emplea la fuerza del viento que actúa sobre ella para orientar al rotor

ubicado delante de la torre que lo soporta.

7) Mecanismo de orientación: Es el sistema que hace girar la gondola de tal manera que el rotor permanezca orientado en dirección del viento.

8) Generador: Es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, es decir, convierte el movimiento de rotación transmitido por los ejes al generador en energia eléctrica.

9) Torre: Es la estructura que soporta a todos los componentes del aerogenerador, la altura de la torre es de acuerdo al flujo de viento, el aerogeneradro se coloca a la altura en la cual el flujo de aire mantiene una generación de energía constante.

   Generalmente la altura de la torre constituye entre 1 y 1.5 veces el diametro del rotor, aunque esto puede cambiar dependiendo de la topografia del lugar donde se instale y el perfil del viento de ese lugar.[19]

   La gran mayoría de las torres se construyen a partir de acero con formas tubulares o en celosía aunque para pequeños tamaños existen estructuras basadas en hormigón. Las torres deben evitar frecuencia natural.[17]

10) Rotor: El rotor es una parte importante del aerogenerador, sin el cual no funcionaría el sistema. El rotor como tal es el que permite transformar la energía cinética del aire en movimiento rotatorio, el cual es utilizado por el generador eléctrico para producir energía.[4]

11) Multiplicadora o caja de engranes: Puede estar presente o no. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación, en el eje del generador eléctrico.[13]

2.5 Diseño CAD

El Diseño Asistido por Ordenador (CAD por sus siglas en ingles) han revolucionado el diseño mecánico y los procesos de producción. Ya no hay más necesidad de complicados cálculos y ecuaciones matemáticas para resolver problemas de tangencias, intersecciones, posiciones de centros o superficies complejas.

El software de automatización de diseño mecánico de SolidWorks, es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrico y basada en operaciones que aprovecha la facilidad de aprendizaje de la interfaz gráfica de usuario de Windows. Puede crear modelos sólidos en 3D totalmente asociativos con o sin restricciones mientras utiliza al mismo tiempo las relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención del diseño.[20]

2.6 El viento

Para aprovechar la energía eólica, es muy importante tener en cuenta las grandes variaciones de velocidad entre diferentes zonas: lugares que apenas distan unos kilómetros entre sí pueden estar sujetos a condiciones de viento muy dispares y suscitar un interés muy distinto a la hora de instalar un aerogenerador. La fuerza del viento cambia en cuestión de días, horas o minutos, en función de las condiciones meteorológicas. Además, la dirección y la intensidad del viento fluctúan rápidamente en torno al valor medio: se trata de las turbulencias, que son una característica importante del viento, ya que determinan las fluctuaciones de la fuerza ejercida sobre las palas de las turbinas, aumentando así su desgaste y reduciendo su vida media. En tierra, el nivel de turbulencias puede variar entre el 15 % y el 20 %, mientras que en mar abierto este valor puede estar comprendido entre el 10 % y el 14 %. La variabilidad y la aleatoriedad del viento representan las principales desventajas de la electricidad procedente de una fuente eólica. Siempre y cuando la cantidad de potencia generada por la instalación eólica sea relativamente pequeña en cuanto a las "dimensiones"de la red eléctrica a la que está conectada, la variabilidad de la producción eólica no desestabilizará esta red y los generadores convencionales pueden

considerarla como una variación de la demanda. [14]

El viento es el movimiento del aire respecto a la superficie terrestre. Este movimiento es fundamentalmente horizontal.

Existen tres componentes que determinan la potencia disponible de un sistema de conversión de energía eólica:

a) Velocidad del viento: Es un parámetro crítico porque la potencia varía según el cubo de la velocidad del viento, o sea, una o dos veces más alta significa ocho veces más de potencia. Además, la velocidad varía directamente con la altitud sobre el suelo, por la fricción causada por montañas, árboles, edificios y otros objetos. Las turbinas eólicas requieren una velocidad de viento mínima para empezar a generar energía: para pequeñas turbinas, este es, aproximadamente, de 3,5 metros por segundo (m/s); para turbinas grandes, 6 m/s, como mínimo.[21]

b) Características del viento (turbulencia): Mientras que los modelos de viento globales ponen el aire en movimiento y determinan, a grandes rasgos, el recurso del viento en una región, rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, pueden mostrar la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es. [21]

c) Densidad del aire: Temperaturas bajas producen una densidad del aire más alta. Mayor densidad significa más fluidez de las moléculas en un volumen de aire dado y más fluidez de las moléculas encima de una pala de la turbina produce un rendimiento más alto de la potencia, para una velocidad del viento dada. [21]

2.6.1 México como productor de energía eólica

México cuenta con uno de los potenciales más altos de generación de energía eólica en el mundo la energía eólica en México representa un importante potencial que permite visualizar al país

como un importante productor de infraestructura eólica con un crecimiento de 1 400 mega watts (MW) al cierre de 2012, lo que equivale a la energía que requiere una ciudad como Puebla, y se prevé que para 2020 alcance los 12 000 MW. De acuerdo con el National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos se estima que el potencial de México para el caso de la energía eólica es superior a los 40 000 MW (actualmente hay una capacidad instalada de 185 MW). [22]

En particular la región del istmo de Tehuantepec presenta velocidades de viento ideales para este tipo de generación con uno de los mayores potenciales de generación, de energía eólica en todo el mundo, calculado entre 5 000 y 7 000 MW de capacidad anual, suficiente para abastecer a 18 millones de habitantes del medio urbano. El enorme potencial del istmo de Tehuantepec se debe a la potencia del viento, que excede los 1 200 watts por metro cuadrado (W/m2) entre los meses de octubre y febrero; a su velocidad estimada en ocho metros sobre segundo (m/s) a 50 metros por arriba del suelo y a la presencia de crestas y cordilleras con elevaciones de terreno de 500 a 1 000 metros sobre todo en las zonas de La Mata, La Venta y La Ventosa. [22]

En este sitio, en particular en los municipios de Juchitán de Zaragoza, El Espinal, San Dionisio del Mar, Asunción Ixtaltepec, Unión Hidalgo, Santo Domingo Ingenio, entre otros, empresas eólicas trasnacionales, y con el apoyo del gobierno mexicano e instituciones financieras internacionales, desarrollan los parques eólicos terrestres a gran escala que integran el Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec, con los argumentos de reducir emisiones de GEI, generar energía limpia y promover el desarrollo económico de Oaxaca, uno de los estados con mayores niveles de pobreza en México. [22]

De acuerdo con la Asociación Mexicana de Energía Eólica (amdee), la distribución de energía eólica en México hasta el año 2018, era en 13 Estados, con 56 parques eólicos, dicha distribución se muestra en la Figura 2.4.

Para el año 2020/2022 en México se tiene provisto que aumenten los parques eólicos, debido a la

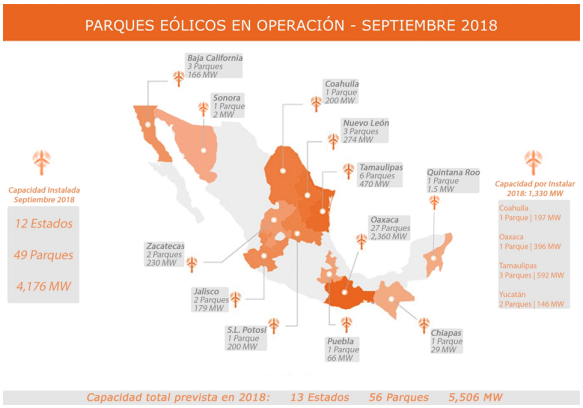


Fig. 2.4: Distribución de energía en México; fuente: https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2018.

demanda de energía eléctrica; de acuerdo con la amdee, el numero de Estados con parques eólicos amuentaría de 12 a 17, lo cual permitirá el aumento de Kilowatts de energía. La distribución provista para este se año se aprecia en la Figura 2.5.



Fig. 2.5: Distribución de energía en México para el año 2020/2022; fuente https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2020.

2.6.2 Aprovechamiento del viento

El aire es considerado como un fluido, incompresible y en estado estacionario, al ser considerado como un fluido, el aire posee una masa, densidad, peso específico etc. Dicha masa al moverse, da origen al viento, la masa posee una energía cinética y potencial. La energía cinética del viento puede ser utilizada, dicha energía se calcula con la expresión matemática:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2.1}$$

Dónde:

E_c: Es Energía cinética en Joule/S

m : Es la masa del aire en Kg.

v: Es la velocidad el aire en m/s

Si suponemos una área de captación A (o área barrida por las palas) perpendicular a la dirección del viento, la potencia disponible debido al flujo de aire es:

$$P_d = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{2.2}$$

Dónde:

ρ: Es la densidad del aíre en Kg/m^3

A: Es el área de captación en m^2

v: Es la velocidad el aire en m/s

P_d: Es la potencia del viento en W/m^2

Como la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula, la potencia dada por la expresión anterior (Ecuación 2.2) no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima energía recuperable, con un aerogenerador ideal, es igual a 16/27 (aproximandamente 59 %) de la energía total.

2.7 Teorema de Betz

Albert Betz fue un físico alemán, reconocido por sus aportaciones en el campo de la energía eólica, la ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59 %) de la energía

cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. En la Figura 2.6, la velocidad del aire v_1 incide sobre el lado derecho de las palas de aerogenerdor, teniendo una velocidad de salida v_2; v_1 es mayor que v_2, debido a la perdida de la velocidad, es logico que v_2 nunca sera cero, por lo cual no puede extraerse toda la energia cinética del aire.

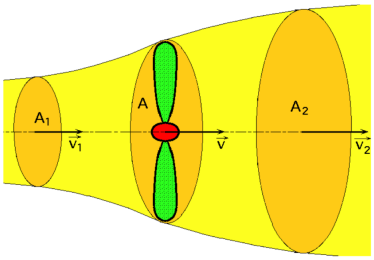


Fig. 2.6: Ley de Betz

La ecuación de la ley de Betz:

$$P_{util} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2}\rho A v_1^3 \tag{2.3}$$

En la ecuación de la Ley de Betz, el factor 16/27 se conoce como el coeficiente de potencia C_p, el cual es aproximandamente del 59 %.

2.8 Generación eléctrica

Uno de los componenetes más importantes de los aerogeneradores, es el generador eléctrico, dicho generador tienen la función de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, en el campo de la enegía eólica tienen función los generadores de imanes permanes, por su gran eficiencia y costo de mantenimiento muy bajo, cabe mencionar que este tipo de generador, no utiliza escobillas, por lo que no existen pérdidas por fricción y calentamiento, haciendólo mas eficiente.

Un generador de imanes permanentes es un generador síncrono (por sus siglas en ingles PMG) en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante.

El funcionamiento del PMG dista mucho de ser como un generador síncrono normal. [23]

El estator o armadura es básicamente un cilindro hueco, tiene ranuras longitudinales en las que hay bobinas del devanado de armadura. Estos devanados llevan la corriente suministrada a la carga eléctrica por el generador.

En un generador síncrono se produce un campo magnético en el rotor ya sea mediante el diseño de éste como un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente de cd a su devanado para crear un electroimán. En seguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador. Dos términos que por lo general se utilizan para describir los devanados de una máquina son devanados de campo y devanados del inducido. En general, el primer término se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina, mientras que el segundo se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas síncronas, los devanados de campo están en el rotor, por lo que los términos devanados del rotor y devanados de campo se utilizan indistintamente. De manera similar, los términos devanados del estator y devanados del inducido se utilizan de manera indistinta. El rotor de un generador síncrono es en esencia un electroimán grande.[24]

La Figura 2.7 muestra las partes de un generador eléctrico.

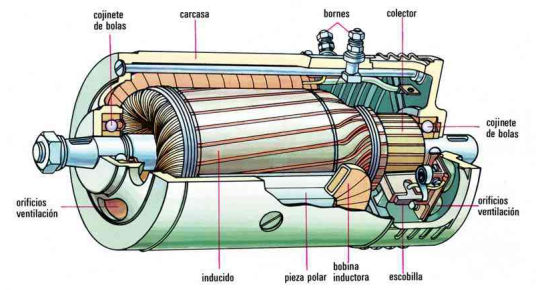


Fig. 2.7: Generador eléctrico

2.9 Teorema del elemento pala

El elemento pala es la superificie de espesor diferencial, obtenida al realizar un corte transversal a las palas Figura 2.8. [1]

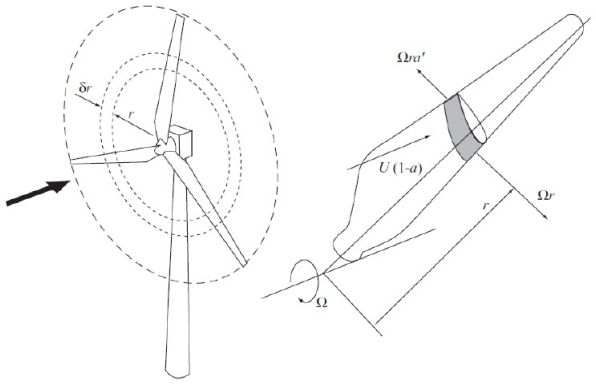


Fig. 2.8: Corte transversal de una pala.[1]

2.9.1 Características del perfil aerodinámico

A continuacion se definen algunos conceptos utiles para el estudio de una pala y en la Figura 2.9:[1]

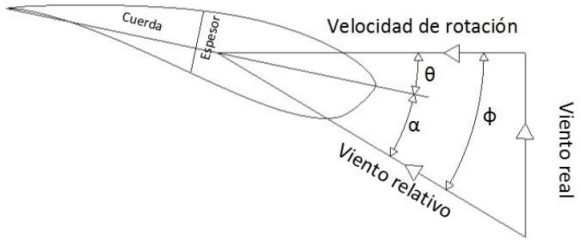


Fig. 2.9: Carácteristicas de un perfil aerodinámico.[1]

1) Cuerda: Es la línea que une a los puntos del perfil que se encuentan mas alejados entre si.

2) Espesor: Es la distancia entre el borde superior e inferior del perfil, medida en la dirección perpendicular a la cuerda.

3) Ángulo de ataque(α): Es el ángulo que forman la cuerda y la velocidad relativa con la que incide el movimiento sobre el perfil.

4) Ángulo de calado o angulo de paso (θ): Es el ángulo que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación de la pala.

5) Ángulo de incidencia o ángulo de flujo(ϕ): Es el ángulo que forma la velocidad rel a la velocidad del plano de rotación de la pala.

Un objeto situado en el seno de una corriente de aire presenta una resistencia al avance, ésta depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del viento. Al estudiar los efectos de la resistencia del aire sobre un cuerpo, se observa que la resultante de las fuerzas aplicadas al cuerpo es un vector cuyo punto de aplicación es su centro aerodinámico o centro de empuje, siendo su dirección perpendicular al viento relativo y su intensidad es proporcional a la superficie expuesta y al cuadrado de la velocidad del viento.[16]

En la Figura 2.10, se pueden observar otras partes del perfil de una pala.

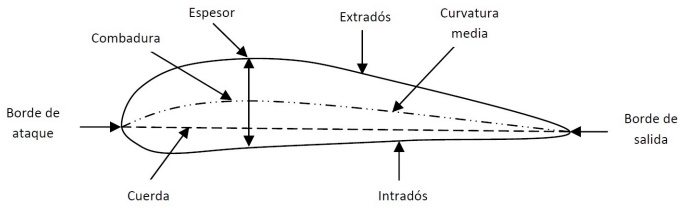


Fig. 2.10: Partes del perfil de una pala

La cual consta de la siguiente parte:

1) Extradós: Parte superior del perfil.

2) Intradós: Parte inferior del perfil.

3) Borde de ataque: Borde delantero del perfil.

4) Borde de salida: Borde trasero del perfil.

5) Cuerda geométrica: Línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida.

6) Línea de curvatura media: Lugar geométrico de los puntos que equidistan de las curvas que definen el extradós y el intradós. Si la línea de curvatura media queda sobre la cuerda geométrica se dice que la curvatura es positiva, si es por debajo, negativa y de doble curvatura si un tramo va por encima y otro por debajo.

7) Combadura: Es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda.

8) Radio de curvatura del borde de ataque: Radio del círculo tangente a las curvas de intradós y extradós y con su centro situado en la cuerda media.

2.10 Fibra de vidrio

Las Fibras de vidrio (Figura 2.11) son producidas estirando monofilamentos de vidrio provenientes de un horno que contiene vidrio fundido y reuniendo un gran número de estos filamentos para formar un cordón de fibras de vidrio.[25]

Cuando el vidrio se solidifica tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra. Las principales propiedades de la fibra de vidrio son las que se presentan a continuación:

1) Es altamente resistente a la tracción.

2) Es muy maleable.

3) Posee muy bajo peso.

4) Es muy buen dieléctrico.

5) Es muy buen aislamiento térmico.

6) Soporta altas temperaturas.

7) No es combustible.

8) No produce gases tóxicos

9) Es imputrescible.

10) Es Inerte a muchas sustancias, incluyendo los ácidos.



Fig. 2.11: Fibra de vidrio

Especificaciones técnicas:

a) Mecánicas

1) Tenacidad (N/tex): 1.30
2) Fuerza a la tracción (MPa): 3400
3) Elongación hasta rotura (%): 4.5

b) Térmicas

1) Conductividad Térmica (W/m °K): 1
2) Resistencia termomecánica: 100 % después de 100 h a 200 °C

c) Eléctricas

1) Resistividad (ohm x cm): 1014 - 1015
2) Factor de disipación dieléctrica: 0.0010 - 0.0018 a 106 Hz

d) Químicas

1) Absorción de humedad a 20 °C y 60 % de humedad relativa (
2) Resistencia a los disolventes: alta
3) Resistencia a la intemperie y los rayos UV: alta

4) Resistencia a microorganismos: alta

Aplicaciones

a) Construcción: tejidos para decoración en locales públicos, aislante

b) Automoción: composites para componentes de vehículos.

c) Deporte: composites para utensilios o aparejos para la práctica de deportes, como esquís, canoas, pértigas etc.

d) Usos industriales: para todo tipo de composites para usos industriales, como piezas plásticas reforzadas con éste tipo de fibra, componentes para ordenadores.

La fibra de vidrio es una fibra o hilo, formado a partir de vidrio. De esta forma, el vidrio demuestra propiedades inusuales: no se agrietará ni se romperá, y en cambio es fácil de doblar sin romperse.[26]

La fibra de vidrio está hecha en tres tipos diferentes:

a) Fibra de vidrio reforzada: Consiste en compuestos de polímeros, los cuales estan reforzados con fibra de vidrio, que pueden ser hechos en diferentes tipos, dependiendo de la composición necesaria.[26]

b) Plástico reforzado con fibra de vidrio: Consta de materiales plásticos reforzados con vidrio.[26]

c) Plástico de carbono o polímero reforzado con fibra de carbono: Esta es la forma más cara de todas tipos disponibles de fibra de vidrio, y sin embargo, también es el más duradero y ligero.[26]

Clasificación de la fibra de vidrio:

a) Vidrio A. Tiene alto contenido en sílice, es sensible a la humedad pero opone resistencia a los ácidos.[27]

b) Vidrio B. Contiene borosilicato de calcio de poco volumen en alcális. Alta durabilidad y exquisitas peculiaridades eléctricas son algunas de sus características.[27]

c) Vidrio C. De precio más costoso que el del vidrio E, pero poseyente de propiedades de resistencia menores y ofrece buena resistencia frente a los agentes químicos.[27]

d) Vidrio D. Es una fibra de vidrio particularizada por su baja densidad pero poseedora de propiedades dieléctricas normales y absorbentes de ondas electromagnéticas.[27]

e) Vidrio E. Los elementos más significativos que conforman básicamente este tipo de vidrio son el borosilicato de calcio y aluminio, en cantidades exiguas contienen potasio y sodio. Es el vidrio utilizado con más frecuencia para producir las fibras que formarán parte de futuros plásticos reforzados, también se utilizan para manufacturar fibras continuas. En cuanto a sus propiedades destacamos su alta densidad, buenas cualidades de rigidez, resistencia y desgaste. Muy utilizado para aplicaciones aeronáuticas, automotrices, náutica, etc. Las fibras realizadas con este tipo de vidrio, se hallan muy difundidas en la creación escultórica, ya que además de tener unas cualidades mínimas que son más que suficientes. Es la fibra más económica de todas.[27]

f) Vidrio ERC. Propiedades eléctricas conjuntadas con resistencia química.[27]

g) Vidrio I. Posee óxido de plomo y es empleado como escudo contra la radiación.[27]

h) Vidrio L. Tiene el plomo como elemento, lo que hace que sea impenetrable por las radiaciones infrarrojas.[27]

i) Vidrio R. Se encuentran en este vidrio ensalzadas todas las cualidades de resistencia, superando a las de otros tipos.[27]

j) Vidrio S. Con propiedades semejantes a las del vidrio anterior, son vidrios de precio aún más elevado.[27]

j) Vidrio X. Su elemento base es el litio, lo que confiere a este vidrio la translucidez a los rayos X.[27]

2.10.1 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

La determinación de la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de las fibras estudiadas se realizó siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM C 1557-03 "Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers". [28]

Para el empleo del metodo mencionado con anterioridad se utiliza un probeta de fibra, la cual se tensiona para ser deformada a velocidad constante hasta producir una fractura en dicha probeta.

Uno de los problemas fundamentales que se presentan para el ensayo de tensión en fibras individuales radica en su sujeción y alineamiento para las pruebas. En este estudio se siguió la recomendación establecida en la norma técnica [28], mediante la cual las fibras se sujetan en un molde hecho de cartulina sobre el cual se adhiere la fibra y luego se lleva este molde a la máquina de ensayos donde es sujetado por mordazas planas recubiertas por caucho para evitar aplastamiento de las fibras, ya que esto afectaría los resultados (ver Figura 2.12).[2]

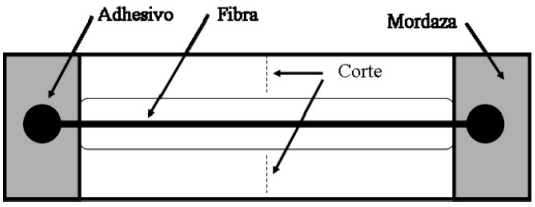


Fig. 2.12: Representación esquemática del molde de sujeción de fibras para ensayo de tensión de fibras individuales.[2]

Una vez las fibras se encuentran sujetas a los moldes y soportadas por las mordazas de la maquina de ensayos, se cortan las dos secciones punteadas mostradas en la Figura 2.12 y así la fibra queda lista para ser ensayada. Los ensayos se realizaron utilizando una maquina de ensayos marca Instron 3366 con una celda de carga con una resolución de 1 mN. La longitud de medición de las fibras fue de 50 mm (zona de ensayo) para todos los casos y se tomo como referencia la línea media de desplazamiento de la máquina de ensayos. La Figura 2.13 muestra la relación

resistencia-densidad σ/ρ contra deformación unitaria para las fibras de vidrio y de queratina ensayadas. La relación resistencia-densidad es un parámetro importante para el análisis de fibras de refuerzo utilizadas en la fabricación de materiales compuestos. Una relación alta indica un material con bajo peso y buena resistencia.[2]

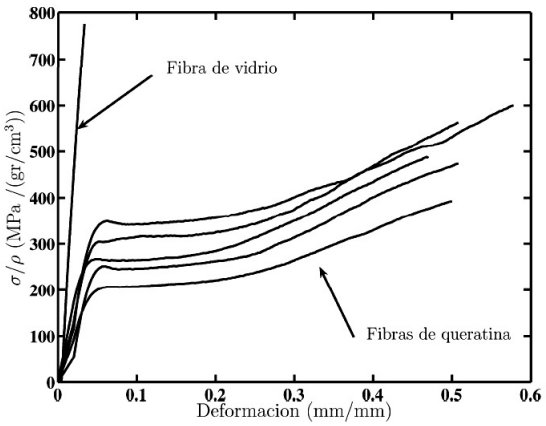


Fig. 2.13: Relación resistencia - densidad obtenida de ensayos de tensión en fibras de vidrio y de queratina.[2]

Los resultados obtenidos de este estudio se muestran en la Tabla 2.1.

Tab. 2.1: Propiedades de la fibra de vidrio

Muestra	Carga máxima (N)	Elongación(mm/mm)	Esfuerzo máximo (GPa)
Fibra de vidrio	0.58±0.15	0.023±0.009	3.6±2.52

2.10.2 Estudios de corrosión en fibra de vidrio

Los materiales compuestos que contienen refuerzo de fibra de vidrio, como FRP (Fiberglass Reinforcedv Plastics, por sus siglas en ingles), se usan ampliamente en diversas aplicaciones en muchas ramas industriales, diferentes incluyendo la industria química y en la industria de pulpa y papel. Durante el comienzo de la era de FRP, el tipo predominante de reforzamiento que se utilizó fue la fibra de vidrio E. Aunque se sabía que la resistencia a la corrosión de dicha fibra era inferior a fibras de otros tipos, como la fibra de vidrio C, la primera se ha desarrollado para ser el tipo estándar de fibra utilizada en materiales compuestos.[29]

Debido a su resistencia a la corrosión, la fibra de vidrio reforzada con plásticos se usan a menudo para construir tanques, tuberías, depuradores, vigas, rejillas y otros componentes para uso en corrosivos ambientes. Sin embargo, la fibra de vidrio es susceptible a fallas por agrietamiento por corrosión bajo tensión ambiental (Environmental Stress-Corrosion Cracking, por sus siglas en ingles ESCC) similar a los componentes metálicos tradicionales.[3]

En los primeros días de la fabricación de FRP, se creía que la resistencia a la corrosión de la fibra es de menor importancia ya que la matriz de resina debe proteger el refuerzo de cualquier ataque. Esta opinión sigue predominando y, a lo largo de los años, la mayor parte del enfoque se ha puesto en Resistencia química"de la resina, no en la fibra de vidrio. A finales de los 70, se descubrió, sin embargo, que los laminados de FRP podrían sufrir grietas por corrosión bajo tensión relacionadas con la fibra de vidrio en ambientes ácidos.[29]

La simultánea presencia de un ambiente corrosivo (típicamente ácido) y aplicado La carga se combina para causar una falla prematura de la fibra de vidrio. Fracaso debido a ESCC puede ocurrir en componentes cargados a niveles mucho debajo de su carga de diseño. El modo de falla ESCC ocurre en fibra de vidrio porque muchos tipos de fibras de vidrio, que son los componentes principales de soporte de carga de una matriz FRP, son susceptibles a ataque por ácidos. El ESCC generalmente ocurrirá más rápido en componentes bajo cargas más altas, a concentraciones de ácido más altas y a niveles más altos de temperaturas.[3]

Las fibras de refuerzo del laminado necesitaban protección contra cualquier posible contacto con el medio ambiente que se logró mediante una llamada capa de barrera química hecha de una capa de resina pura, una capa de resina con velo superficial o un revestimiento.[29]

2.10.3 Susceptibilidad de las fibras de vidrio a la corrosión

Una variedad de fibras de vidrio está manufacturas con resistencia variable al ataque ácido. La descripción de los usos comunes de las fibras manufacturas se enlistan en la tabla de la Figura

2.14.

Glass type	Application	One day weight loss in 10% H_2SO_4 (%)
E-glass	General purpose fibers	39
ECR-glass®	Used where acid corrosion resistance is desired	6.2
S-2 glass®	Used for reinforcement in composite structural applications which require stability under extreme corrosive environments	4.1
C-glass	Used for chemical stability in corrosive acid environments	2.2
A-glass	General purpose fibers	0.4

Fig. 2.14: Descripción de las aplicaciones de tipo de vidrio y susceptibilidad al ataque ácido.[3]

Estos datos (tabla 2.14) no miden la ESCC, esos datos corresponden a el rendimiento bajo carga en un ambiente ácido; Sin embargo, la elección de fibra de vidrio hace afectar el rendimiento de una estructura de fibra de vidrio que opera en un ambiente ácido. En muchas estructuras tradicionales de FRP, una fibra menos resistente a los químicos, como el vidrio E, se utiliza como fibra de vidrio estructural principal y una fibra más resistente a los químicos utilizado en una barrera contra la corrosión. Algunos autores recomiendan que para durabilidad a largo plazo de estructuras de FRP, fibras resistentes a la corrosión debe usarse en toda la matriz.[3]

Porque muchos tipos de fibras de vidrio que se usan en FRP son susceptible al ataque por ácido, una aplicación exitosa a largo plazo de FRP en un ambiente ácido bajo estrés requiere que las fibras sean protegidas a la exposición del ácido. Una resina protectora rica, a menudo se usa empleando una capa de aproximadamente 100–250 mil de espesor en las superficies de la estructura adyacentes al ácido y a las fibras estructurales, como las fibras de vidrio E, se encuentran en el interior de la estructura debajo de esta capa protectora. La capa exterior de la capa protectora consiste típicamente en aproximadamente 95 % de resina y se refuerza con velos de fibra de vidrio resistente a la corrosión. El desempeño satisfactorio de la estructura de fibra de vidrio en un ambiente ácido depende sobre el mantenimiento de la integridad de la capa protectora.[3]

2.11 Método del elemento finito

El método del elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales, utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también llamada discretización.

El método de elementos finitos es un método numérico para resolver problemas de ingeniería. Las típicas áreas problemáticas de interés en ingeniería y física-matemática son las que se puede resolver mediante el uso del método de elementos finitos incluyendo un análisis estructural, transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa y potencial electromagnético.[30]

Para problemas relacionados con geometrías complicadas, cargas y propiedades de materiales, generalmente no es posible obtener soluciones analíticas matemáticas. Las soluciones analíticas son aquellas dadas por una expresión matemática que produce los valores de cantidades desconocidas deseadas en cualquier ubicación de un cuerpo (estructura total o física sistema de interés) y, por lo tanto, son válidos para un número infinito de ubicaciones en el cuerpo. Estas soluciones analíticas generalmente requieren la solución de diferencial ordinario o parcial ecuaciones que, debido a las complicadas geometrías, cargas y materiales propiedades, generalmente no se pueden obtener. [30]

Por lo tanto, necesitamos confiar en métodos numéricos, como el método de elementos finitos, para soluciones aceptables. La formulación de elementos finitos del problema resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas para solución, en lugar de requerir la solución de ecuaciones diferenciales. Estos métodos numéricos producen valores aproximados de las incógnitas en números discretos de puntos en el continuo.[30]

De ahí este proceso de modelar un cuerpo dividiéndolo en un equivalente sistema de cuerpos o unidades más pequeñas (elementos finitos) interconectados en puntos comunes a dos o más elementos (puntos nodales o nodos) y / o líneas de límite y / o superficies se llama discretización. En el método de elementos finitos, en lugar de resolver el problema para todo el cuerpo en una operación, formulamos las ecuaciones para cada elemento finito y combinarlos para obtener la solución de todo el cuerpo.[30]

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano.[31]

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.[31]

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.[31]

2.11.1 Principios del método del elemento finito

El análisis por elemento finito resuelve estructuras continuas, la idea general es la división del continuo en pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, de esta forma se pasa de un sistema con infinitos grados de libertad, a un sistema con finitos grados de libertad cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.[31]

Considérese la Figura2.15 (a): El primer paso es dividir la barra como una flecha de sección variable, consistente en un número discreto de elementos, cada uno con sección transversal uniforme. Específicamente, se modela la barra utilizando cuatro elementos finitos como se muestra en la Figura 2.15 (b): dentro de cada región se evalúa el área transversal promedio y luego se usa para definir un elemento con sección transversal uniforme.[31]

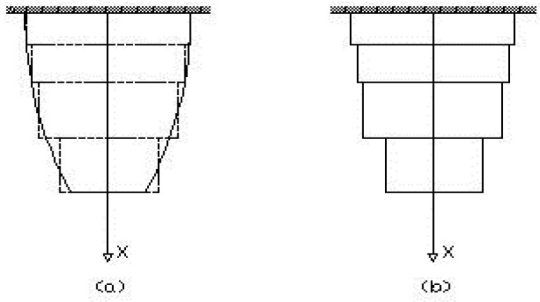


Fig. 2.15: Discretización con elemento finito de una barra.

Como se puede apreciar, en la Figura 2.15, regiones de la pieza original quedan fuera y regiones inexistentes quedan dentro de la nueva pieza, entonces es fácil deducir que la calidad de nuestra división, dará un resultado más exacto. Por ejemplo, si se divide la pieza en elementos triangulares como se muestra en la Figura 2.16, los elementos llenan casi toda la región excepto una pequeña región en la frontera; entre más pequeños sean los elementos menor será dicha región.[31]

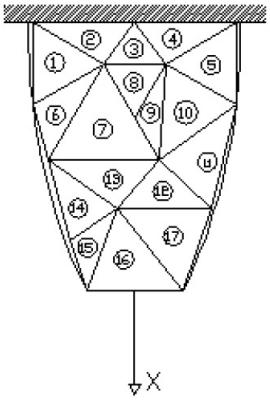


Fig. 2.16: Discretización con elementos triangulares.

2.11.2 Matriz de rigidez

La matriz de rigidez establece la relación de deformación para definir el comportamiento de un elemento que se someta a un análisis de tensión; para desarrollarla se considera el término de energía:[31]

$$U_e = \frac{1}{2}\int \sigma^T \epsilon A dx \tag{2.4}$$

Donde U_e es la energía de deformación unitaria y E es el módulo de Young del elemento en cuestión. Sustituyendo $\epsilon = EBq$ y $\sigma = Bq$ en la expresión anterior resulta:

$$U_e = \frac{1}{2}\int B^T q^T EBqAdx \tag{2.5}$$

$$U_e = \frac{1}{2} q^T \int B^T EBqAdx \tag{2.6}$$

En el modelo del elemento finito (Figura2.17), el área de la sección transversal del elemento e denotado por A_e, es constante. Además, B es una matriz constante.

Con la ecuación de elasticidad se tiene que:

$$dx = \frac{x_2 - x_1}{2} d\xi \tag{2.7}$$

Denotando el cambio de longitud del elemento como:

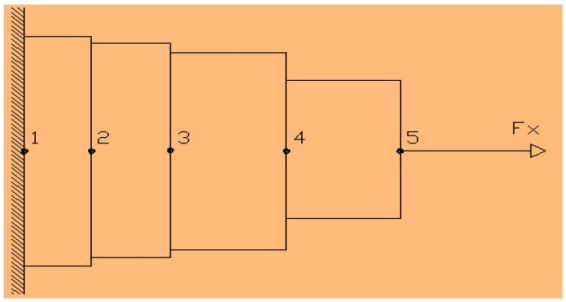


Fig. 2.17: Placa mallada para análisis de elemento finito.

$$\ell_e = x_2 - x_1 \tag{2.8}$$

Se tiene que:

$$dx = \frac{\ell_e}{2} d\xi \tag{2.9}$$

Donde $-1 \leq \xi \leq 1$, por lo tanto U_e se escribe como:

$$U_e = \frac{1}{2} q^T [A_e \frac{\ell_e}{2} E_e B^T B \int_{-1}^{1} d\xi] \tag{2.10}$$

Donde $\int_{-1}^{1} d\xi = 2$ y sustituyendo $B = \frac{1}{x_2 - x_1}[\ -1 \quad 1\ ]$

Simplificando se tiene:

$$U_e = \frac{1}{2} q^T \frac{A_e E_e}{\ell_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} q \tag{2.11}$$

$$\Rightarrow U_e = \frac{1}{2} q^T k^e q \tag{2.12}$$

$$\therefore k_e = \frac{A_e E_e}{\ell_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

De acuerdo con la Figura2.17, esta pieza es bidimensional y el desplazamiento es producido por la fuerza aplicada. Para el estudio de esta placa se considera cada sección como un resorte con relacion de fuerza, rigidez y desplazamiento. Con lo que se tiene la configuración de la Figura

2.18.

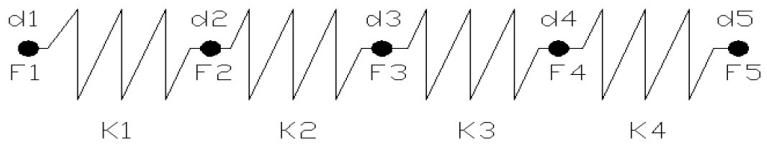


Fig. 2.18: Representación de la placa en conjunto de resortes.

Para calcular la fuerza en un resorte se emplea la ecuacion:

$$F = kx \tag{2.14}$$

Donde F es la fuerza aplicada, k es la constante de rigidez y x es el desplazamiento.La constante de rigidez esta dada por la ecuación:

$$k = \frac{EA}{L} \tag{2.15}$$

Donde E es el módulo de Young, A es el área de sección transversal del elemento y L es la longitud del elemento. La ecuación para cada placa esta dado por:

$$k_1(d_1 - d_2) = F_1 - F_2 \tag{2.16}$$

$$k_2(d_2 - d_3) = F_2 - F_3 \tag{2.17}$$

$$k_3(d_3 - d_4) = F_3 - F_4 \tag{2.18}$$

$$k_4(d_4 - d_5) = F_4 - F_5 \tag{2.19}$$

Escribiendo de forma matricial las ecuaciones anteriores:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & -k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

2.12 Materiales compuestos

Uno de los tipos de materiales que durante los últimos años ha presentado un crecimiento más acelerado en cuanto a utilización y desarrollo son los denominados materiales compuestos. Estos pueden ser definidos como un sistema de materiales constituido por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre si. Su alta utilización radica en la significativa mejora de propiedades que pueden obtenerse al mezclar materiales básicamente disímiles. De esta manera se puede lograr que un material frágil y de baja resistencia se combine con otro dúctil y de moderada resistencia para obtener un material de ductilidad moderada y con buena resistencia.[2]

Debido a la creciente demanda por parte de las autoridades ambientales por una utilización de materiales amigables con el medio ambiente, y con el deseo industrial de reducir el costo de las fibras utilizadas tradicionalmente como refuerzo para materiales compuestos (Fibras de carbono, vidrio y aramida), se ha incrementado durante los últimos años el desarrollo y manufactura de materiales compuestos reforzados con fibras naturales. [2]

Los materiales compuestos se forman con dos o más materiales distintos, cada uno de los cuales contribuye a conformar las propiedades finales. A diferencia de las aleaciones metálicas, los materiales de un compuesto permanecen distintos a los otros a nivel macroscópico. La mayoría de los compuestos que se utilizan en ingeniería constan de dos materiales: un refuerzo llamado

rellenador y una matriz. El reforzador proporciona rigidez y resistencia; la matriz mantiene juntos los materiales y sirve para transferir carga entre los refuerzos discontinuos. Los refuerzos más comunes, que se ilustran en la Figura 2.19, son las fibras continuas, rectas o tejidas, las fibras recortadas y las que contienen partículas. Las matrices más comunes son diferentes resinas plásticas aunque se usan otros materiales, entre ellos, metales.[11]

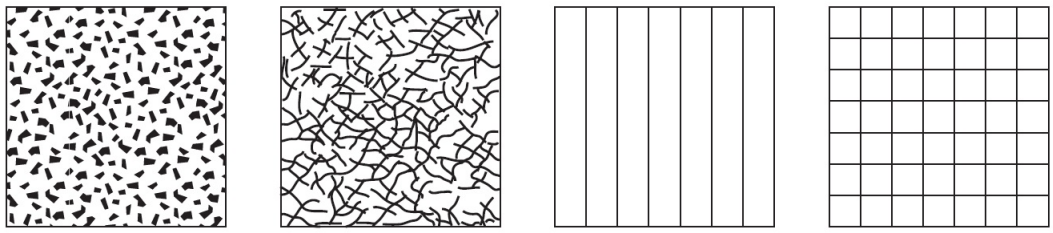


Fig. 2.19: Compuestos ordenados por tipo de refuerzo.

Los composites o materiales reforzados con fibras, identificados como FRP, deben estas siglas a la denominación en lengua inglesa: "Fiber Reinforced Plastics". En español se designan como PRF: Plásticos Reforzados con Fibras. En lo que respecta a los aspectos básicos que determinan un FRP, destacamos su composición basada esencialmente en dos elementos:[27]

a) La matriz resinosa: que puede ser de resina de poliéster o algún otro tipo como epoxi, poliuretano, acrílica, etc.[27]

b) Un refuerzo: Fibras o tejidos de vidrio o de carbono,
etc.[27]

Los materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen propiedades de los cerámicos, los plásticos, los metales, etc. de manera tal, que sea posible manipular las propiedades del material, variando aspectos como son: la rigidez, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la corrosión, la resistencia a la abrasión, la reducción de peso, la capacidad de trabajo a altas y bajas temperaturas, etc.[32]

Los Materiales Compuestos laminados (MCL), son materiales estructurados tipo sándwich constituidos por capas delgadas unidas por un medio. Los constituyentes pueden ser

capas metálicas-metálicas, metálicas-no metálicas, metálicas-cerámicas, cerámicas-no metálicas, metálicas-cerámicas-no metálicas, no metálicas-no metálicas y pueden tener distintas configuraciones (véase Figura2.20).[4]

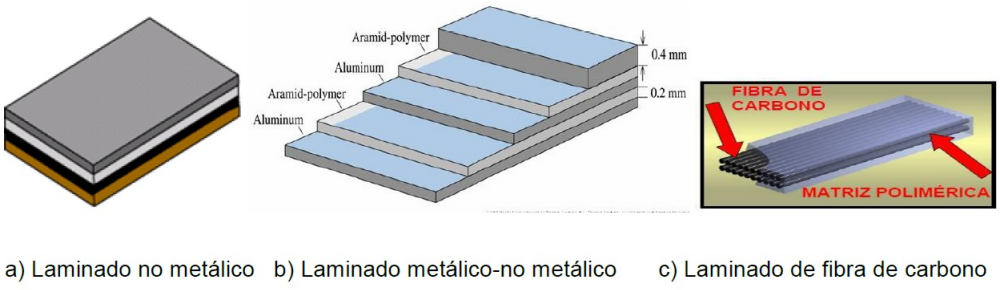


Fig. 2.20: Materiales compuestos laminados (MCL).

Estos compuestos pueden ser simétricos y no simétricos. Los compuestos laminados simétricos son aquellos constituidos por capas delgadas y que se considera que tiene la misma configuración en cada mitad de la lámina (ver Figura 2.21).[33]



Fig. 2.21: Compuesto laminado metálico simétrico con capas isótropicas.

2.12.1 Interface

La interface es una capa física que se forma entre las componentes de los materiales compuestos, se considera que esta se produce por la unión en los compuestos (por pegamento, fusión, metálica o de resina, defectos de manufactura, etc.) o por la unión entre materiales con propiedades mecánicas diferentes. Es importante mencionar que la interface existe, si no visualmente si como que tiene influencia en el comportamiento mecánico, y que su estructura y composición tienen

un papel muy importante y es diferente para cada tipo de material por lo que su descripción mecánica es fundamental. [32]

2.12.2 Teoría clásica de láminas

La teoría clásica de láminas fue la primera herramienta para analizar el comportamiento mecánico de placas laminadas compuestas (Tsai, 1980, Jones, 1975, Parton, 1993, Ugural, 1999). Dicha teoría se basa en las hipótesis de Kirchhoff, dando resultados aceptables de desplazamientos y de esfuerzos en el plano, y no considera los esfuerzos cortantes transversales en el análisis. Lo anterior no puede ser ignorado en placas no tan delgadas ni en láminas compuestas con elevadas diferencias en las propiedades elásticas de las capas que las conforman. Esto es porque las suposiciones que se hacen se cumplen sólo en parte del problema y no en todo (Pagano 1981), lo que limita su aplicación en problemas de mayor complejidad (fractura, esfuerzos residuales, etc.). Esto ha motivado a través de los años el desarrollo de diversos modelos numéricos, que permiten analizar problemas mecánicos imposibles de analizar con la teoría clásica. Pagano en 1969 presenta una solución exacta para un compuesto laminado en flexión cilíndrica y en 1974 un trabajo en el que justifica la importancia de las propiedades efectivas (globales) en las soluciones de compuestos reforzados con fibras. Puppo y Evensen (1970) desarrollaron la primera aproximación para la solución de láminas compuestas pero despreciaron los esfuerzos normales interlaminares, Whitney (1973) propuso otro método utilizando una teoría de mayor orden para analizar materiales compuestos, la cual fue extendida por Pagano (1974). Desde entonces, se han desarrollado otros métodos para analizar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos. [34]

2.12.3 Campos de estudio de los materiales compuestos

Los campos relacionados con el estudio de los materiales compuestos de mayor interés son:

1) El análisis de esfuerzos.

2) La obtención de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, etc.

3) Los modelos matemáticos.

4) Los métodos computacionales.

5) Los métodos experimentales.

La ventaja de los métodos experimentales respecto a los modelos matemáticos y métodos computacionales, es que, los datos obtenidos de ellos, son verídicos pues involucran parámetros que llevan integrados el efecto de variables no controladas como defectos estructurales, defectos de pegado, no uniformidad de capas, etc., que no pueden ser incluidos en forma adecuada en los modelos matemáticos y los métodos computacionales. Es por eso que, los métodos experimentales son apropiados para análisis de esfuerzos, para validar modelos, calibrar y evaluar la eficiencia de los métodos computacionales.[32]

Las clasificación de los materiales compuestos se presenta en la Figura 2.22

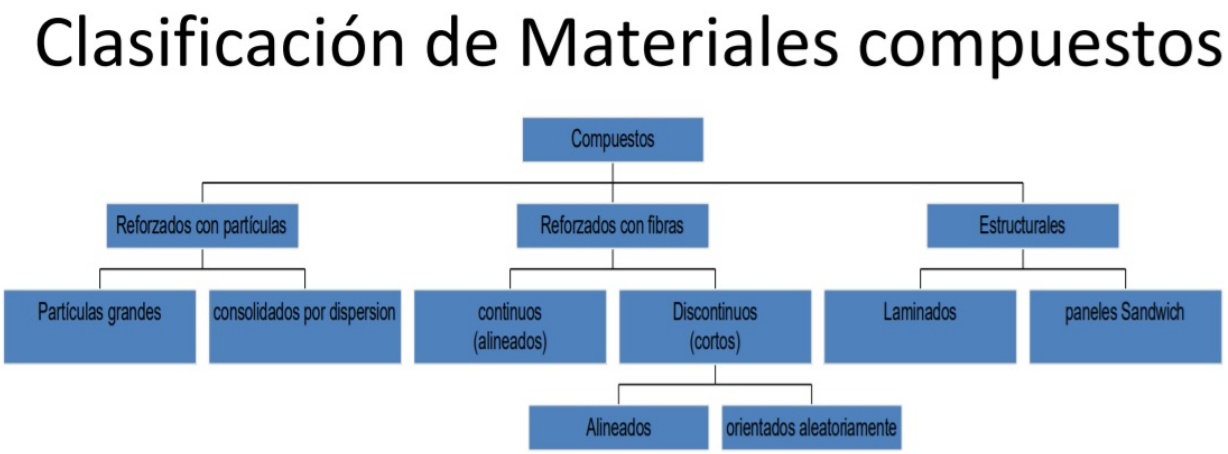


Fig. 2.22: Clasificación de los materiales compuestos.

2.12.4 Componentes de los materiales compuestos

En los campo de los materiales compuestos se pueden identificar dos fases o componentes principales de los cuales estan constituidos:

1) Una fase discontinua y más rígida, que se denomina refuerzo.

2) Otra fase continua y generalmente menos rígida, que se denomina matriz.

Matriz: La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda "embebido". Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel.[33]
Las funciones principales de la matriz son:

1) Definir las propiedades físicas y químicas.

2) Transmitir las cargas al esfuerzo.

3) Protegerlo y brindarle cohesión.

Las matrices comunmente usadas en materiales compuestos se clasifican según el comportamiento térmico del polímero, tenemos:

1) Termoplásticos:Son polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, permitiendo su moldeabilidad en la forma deseada, que quedará preservada al enfriarse.

2) Elastómeros: Son polímeros que poseen cadenas con mucha libertad de movimiento molecular (flexibilidad).

3) Termoestables: Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remoldeados. Molecularmente hablando tienen una estructura entrecruzada y por lo tanto tienden a ser resinas de mucha rigidez, y al someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero. A temperatura ambiente son duros y frágiles.

Al someter al material compuesto a diferentes tipos de cargas mecánicas la matriz juega diferentes roles:[33]

1) Bajo cargas compresivas la matriz es la que soporta el esfuerzo ya que se trata de la fase continua.

2) En tracción la matriz transfiere la carga aplicada a cada una de las fibras o partículas.

Propiedades de las matrices:[32]

1) Soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta;

2) Transfiere la carga a las fibras fuertes.

3) La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Material de refuerzo: Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión. El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.[33]

2.13 Extensometría eléctrica de resistencia variable

La extensometría eléctrica es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la conductividad eléctrica de un material al aplicarle una fuerza a través del mismo. Los equipos de adquisición de datos son los dispositivos usados para la adquisición de señales, ya sean análogos o digitales. Funcionan a modo de multímetros de gran precisión. Cuando queremos obtener información sobre fenómenos físicos utilizamos transductores transformando el parámetro físico en un parámetro eléctrico. Dichas señales sufren un acondicionamiento de la señal mediante la amplificación, el filtrado y el aislamiento eléctrico. En estos equipos podemos encontrar entradas analógicas tanto referenciadas a masa (miden tensión grande), como diferenciales (miden tensión pequeña a través del puente de Wheatstone. Las señales diferenciales se basan en que las dos terminales de una entrada corresponden con dos terminales de entrada de las tarjetas de adquisición de datos, es decir, no existe terminal referenciado a masa; de esta forma eliminamos la tensión en modo común. Esta configuración

de entrada es útil para la adquisición de señales de bajo nivel como por ejemplo las galgas extensiométricas.

2.13.1 Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable

El equipo necesario para realizar la extensometría eléctrica se enlista a continuación:

1) Extensómetro eléctrico de resistencia variable (strain gage).

2) Probador de instalación de extensómetros (Gage Intalation Tester 1300).

3) Puente de Wheatstone P3-Strain.

En la Figura 2.23, se muestra la técnica de extensometría eléctrica.



Fig. 2.23: Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable.[33]

2.13.2 Extensómetro eléctrico de resistencia variable (strain gage)

Extensometría eléctrica de resistencia variable es una técnica punto a punto derivada de los cambios en la resistencia de un material conductor que es estirado.[33]

1) Ventajas: Es una tecnología madura, de bajo costo, disponible comercialmente, muy precisa (debajo de 0.1 $\mu\varepsilon$) de pequeña masa y volumen, se puede monitorear a control remoto, puede medir a tensión y compresión, reutilizable, buena respuesta de frecuencia, fácil de pegar, se puede usar para amplia gama de materiales.

2) Desventajas: No es de campo completo, requiere habilidades para instalar e interpretar resultados, las deformaciones medidas son promedio, se requieren tres mediciones para el

resultado completo de esfuerzos, la elongación esta limitada al 20 % aproximado. Se aplica en análisis de esfuerzos de componentes de ingeniería y estructura, es un elemento sensor para muchos tipos de transductores.

2.13.3 Probador de instalación de extensómetros (Gage Intalation Tester 1300)

Dos de las medidas más importantes que se utilizan para verificar la calidad de una instalación de extensómetros son: la resistencia de aislamiento (fuga a tierra) y el cambio en la resistencia de banda debido a los procedimientos de instalación. Si bien estas dos medidas no son una garantía completa del rendimiento del extensómetro, cualquier instalación que produzca valores cuestionables no se debe confiar en la precisión de los resultados. Por ejemplo, una diferencia de tensión entre la muestra y el extensómetro con frecuencia existe. Una baja resistencia de aislamiento permitirá un diferencial de tensión para introducir señales extrañas durante la medición. En la Figura 2.23, se muestra un probador de extensómetros.[32]

Varias causas de la variación en la resistencia de aislamiento y los cambios en la resistencia de banda son:

1) Resistencia de aislamiento de más de 20.000 megaohmios se debe esperar para bandas extensométricas de papel de aluminio cuando se instala en condiciones de laboratorio. Un valor de 10.000 megaohmios debe considerarse mínimo. Una lectura por debajo de este valor indica generalmente materias extrañas, humedad, flujo residual o respaldo de daños atrapado debido a la soldadura, así como la evaporación incompleta del disolvente a partir de un recubrimiento.

2) Deterioro de la resistencia de aislamiento con el tiempo puede ser una indicación de una instalación inadecuada del recubierto.

3) A temperaturas más altas de la prueba, sobre todo por encima de 300 ^oF (150 ^oC) es normales esperar que los valores sean menores. Diez megaohmios se considera el valor inferior permisible.

4) Los cambios en la resistencia de banda durante la instalación no deben exceder normalmente de 0,5 % cuando se utilizan adhesivos con temperatura de curado. Cambios en la resistencia de más de 0,5 % en general, indican daños en el medidor debido a la manipulación o de sujeción inadecuada. Sin embargo, las bandas extensométricas instaladas mediante temperatura elevada con adhesivos de curado pueden presentar mayores cambios en la resistencia debido a un bloqueo del adhesivo a temperaturas elevadas (diferencia en el coeficiente lineal de expansión térmica entre el extensómetro y la muestra). Estos cambios pueden variar dependiendo de la temperatura de curado específica y los materiales utilizados. Los cambios nunca deben exceder el 2 % y debe ser uniforme en 0,5 %.

2.13.4 Puente de Wheatstone

Es el circuito mas sensitivo que existe para medir el valor de componentes pasivos como las resistencias, tanto en corriente continua como alterna. El diagrama eléctrico de dicho circuito se representa en la Figura 2.24.

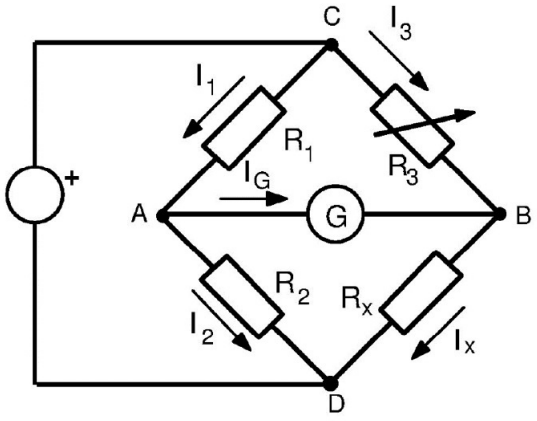


Fig. 2.24: Principio del funcionamiento del puente de Wheatstone.[5]

R_x es la resistencia a medir y R_1, R_2 y R_3 son resistencias de valor conocido. El puente se alimenta con una fuente de tensión continua y se varía el valor de la resistencia R_3 mediante un mando hasta conseguir que el galvanómetro (que es un amperímetro muy sensible) indique que la corriente I_G tiene un valor nulo.[5]



Fig. 2.25: Puente de Wheatstone.[5]

$R_1 = R_3$, por lo tanto la diferencia de corriente sera cero.Si no se conoce el valor de R_x, se debe equilibrar el puente variando el valor de R_2. Cuando se haya conseguido el equilibrio R_x será igual a R_2. R_2 debe ser una resistencia variable con una carátula o medio para obtener valores muy precisos. Si el puente esta equilibrado se tiene:[5]

$$I_G = 0 \rightarrow I_1 = I_2; I_3 = I_x; V_A = V_B$$

$$\frac{V_{CA}}{V_{AD}} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{R_1}{R_2} \tag{2.21}$$

$$\frac{V_{CB}}{V_{BD}} = \frac{I_3 R_3}{I_X R_X} = \frac{R_3}{R_X} \tag{2.22}$$

$$\Rightarrow V_A = V_B \rightarrow \frac{V_{CA}}{V_{AD}} = \frac{V_{CB}}{V_{BD}}$$

$$\therefore R_X = R_3 \frac{R_2}{R_1} \tag{2.23}$$

Normalmente el aparato posee un mando que permite variar el cociente $\frac{R_2}{R_1}$ de forma que tome los valores $10^3, 10^2, 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}$. Por otra parte, el mando (señalado en B en la Figura 2.25)que permite variar la resistencia indica el valor de esta resistencia en cada instante. Por lo tanto, para medir la resistencia R_X con el puente de Wheatstone se accionan los mandos que varían los valores de R_3 y $\frac{R_2}{R_1}$ hasta conseguir que la intensidad I_G se anula y se aplica entonces la

Ecuación 2.23.[5]

Se puede demostrar que si se tiene un puente de Wheatstone equilibrado (I_G) de tal manera que $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ y la resistencia R_X varía su valor en una pequeña cantidad ΔR_X, la intensidad I_G que circula por el galvanómetro es proporcional al cociente:[5]

$$\frac{\Delta R_X}{4R_0} \tag{2.24}$$

Luego, conocido R_0, se puede obtener el valor ΔR_X a partir de I_G. Esta propiedad del puente de Wheatstone se aplica frecuentemente en sistemas de instrumentación. Así, por ejemplo, la medida de deformaciones en una estructura se realiza con bandas extensométricas, cuya resistencia varía según las deformaciones que detecta. Estas variaciones de resistencia se pueden medir con puentes de Wheatstone.[5]

2.14 Strain Gage

Una galga extensométrica o strain gage (en inglés) es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser: presión, carga, torque, deformación, posición, etc. Se entiende por strain o esfuerzo, a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. Si se lo pone en términos matemáticos, strain ϵ se define como la fracción de cambio en longitud, como de demuestra la Figura 2.26 a continuación:[6]

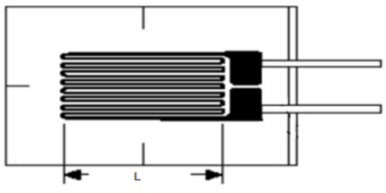


Fig. 2.26: Galga extensométrica.[6]

El parámetro strain puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión); este valor es adimensional. En la práctica, la magnitud de medida de una galga es muy pequeña por lo que

usualmente se expresa como microstrain $\mu\epsilon$. Cuando una barra es tensionada por una fuerza uniaxial, como en la Figura 2.27, un fenómeno conocido como esfuerzo de Poisson causa que la parte transversal de la barra se contraiga en la dirección perpendicular.

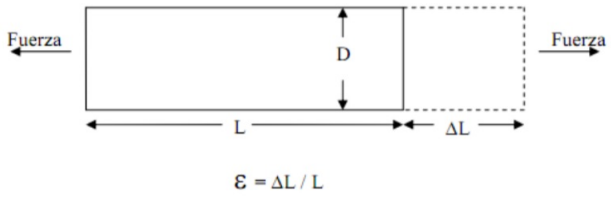


Fig. 2.27: Esfuerzo de poisson.[6]

Existe un parámetro fundamental entre las características de las galgas extensométricas, que es la sensibilidad de elongación o llamado simplemente factor de galga (G). El factor de galga es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud, como se describe en la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \tag{2.25}$$

El factor de galga (G) de un conductor metálico depende en gran parte de las características de la aleación en particular: trabajo en frío, nivel de impurezas en la aleación y el rango de deformaciones sobre el cual se mide. El factor de galga típico para un galga extensométrica metálica es de aproximadamente 2.

La medición de Galgas Extensométricas es un caso especial de medición de la variación que tienen en su resistencia. Se requiere utilizar un puente resistivo para poder medir los pequeños cambios en su resistencia; para ello se utiliza el puente de Wheatstone, inventado por el físico inglés Charles Wheatstone en 1843. [6]

2.14.1 Principio de funcionamiento

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el

material de que esta hecho y el diseño adoptado.[35]

Si se considera un hilo metálico de longitud l, sección transversal A y resistividad ρ, su resistencia eléctrica R es:[35]

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.26}$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto el cambio de R se puede expresar como:[35]

$$dR = \frac{A(\rho dl + l d\rho) - \rho l dA}{A^2} \tag{2.27}$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, Figura 2.28), está dado por la ley de Hooke.[35]

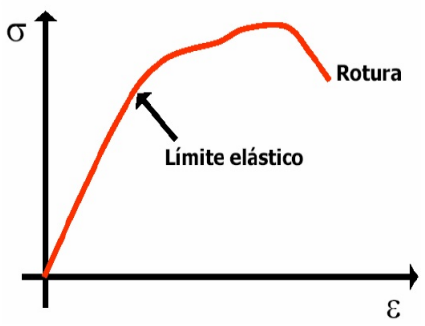


Fig. 2.28: Diagrama de esfuerzo-deformación.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\epsilon = E\frac{dl}{l} \tag{2.28}$$

Donde E es modulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ϵ es la deformación unitaria.Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:[35]

$$\mu = -\frac{\frac{dD}{D}}{\frac{dl}{l}} \tag{2.29}$$

Donde D es el diámetro del hilo y μ es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, en términos de la razón de Poisson tendremos:[35]

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l}(1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} \tag{2.30}$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezoresistencia π definido por la siguiente Ecuación:[35]

$$\pi_1 = \frac{1}{E} = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dl}{l}} \tag{2.31}$$

Por lo tanto el cambio en la resistencia es:

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dl}{l}} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \tag{2.32}$$

El cambio en resistencia de un medidor de deformación por lo general se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante empíricamente llamado factor de galga, GF expresado como:[35]

$$GF = \frac{\frac{\delta R}{R}}{\epsilon} \tag{2.33}$$

Relacionando las Ecuaciones 2.32 y 2.33 se observa que el factor de galga depende de la razón de Poisson para el material del medidor y su piezorresistividad.[35]

2.14.2 Caracteristicas

La construcción típica de un medidor de deformación metálico Figura 2.29, muestra un patrón de hoja metálica que se forma por el procedimiento de fotograbado de una película que previamente ha sido montada en una base plástica de resina flexible.[35]

Los parámetros de una galga impresa se enlistan a continuación:

1) Ancho del soporte.

2) Ancho de la galga.

3) Longitud del soporte.

4) Extremos ensanchados.

5) Longitud activa.

5) Lontitud total de galga.

5) Marcas de alineación.

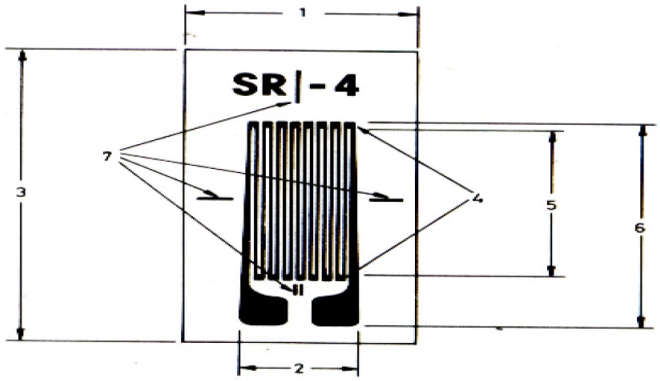


Fig. 2.29: Parámetros de una galga impresa.

Existen dos tipos de galgas básicos:

1) De hilo conductor o lámina conductora: el sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino con terminales adecuados en sus extremos.[35]

2) Semiconductor: Los cristales de silicio son el material básico, se cortan en secciones muy delgadas para formar medidores muy pequeños, presentan resistencia más alta, fatiga de vida más larga y menor histéresis con respecto a los medidores metálicos. Sin embargo, la salida del medidor de [35]

2.15 Teoría de elasticidad lineal

El modelo de la elasticidad lineal obedece las leyes fundamentales de la mecánica de los medios continuos: las leyes de Newton y las leyes de la conservación de la masa y la energía, y, posee las siguientes restricciones: el medio posee masa, es continuo, es lineal, es elástico- lineal y homogéneo. [36]

El modelo de elasticidad lineal está relacionado con medios o cuerpos que tienen la propiedad de ser elásticos. Este modelo se encuentra conformado por el modelo de esfuerzos, el modelo de deformaciones, y por un modelo constitutivo (Ley generalizada de Hooke). Los sistemas de ecuaciones e incógnitas generadas constituyen un modelo generalizado de 15 ecuaciones en derivadas parciales y 15 incógnitas.[33]

2.15.1 Modelo de esfuerzos

El modelo de esfuerzos es esencial para entender la teoría de la elasticidad lineal y sus vastas aplicaciones. Por ello, es necesario sistematizar dicho modelo y determinar las propiedades importantes.

El problema de esfuerzos. El problema de esfuerzos se puede sintetizar de la manera siguiente:

"Determinar un modelo que permita encontrar el estado de esfuerzos de un medio sometido a un sistema de solicitaciones o fuerzas"

Las restricciones del problema son:

1) El medio posee masa.

2) El medio es continuo.

Otra consideración importante asociada con el problema de esfuerzos es la siguiente:

"El análisis es realizado en una sola configuración del medio; es decir, en su configuración deformada"

Por otro lado, para poder realizar el análisis de esfuerzos y construir el modelo, es necesario formular una hipótesis. Dicha hipótesis es la siguiente:

"Se puede analizar y modelar el estado de esfuerzos sobre todo el medio o una parte de él".

2.15.2 Tensor de esfuerzos

Si, además de la sección implicada en el cuerpo libre de la Figura 2.30, se pasa otro plano por el cuerpo a una distancia infinitesimal y paralelo al primero, quedara aislada un rebanada elemental.[7]

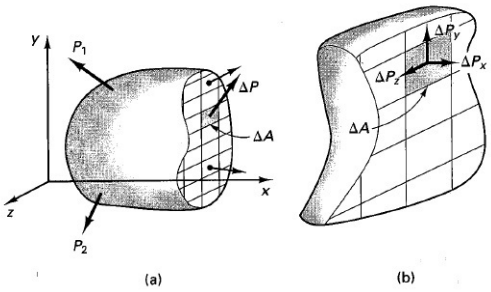


Fig. 2.30: Cuerpo seleccionado: (a) cuerpo libre con algunas fuerzas internas, (b) vista simplificada con componentes de ΔP.[7]

Entonces, si se pasan otros dos pares de planos normales al primer par, quedará aislado del cuerpo un cubo de dimensiones infinitesimales. Este cubo se muestra en la Figura 2.31 (a). Todos los esfuerzos que actúan sobre él estan identificados en el diagrama. Como se indicó antes, los primeros subíndices sobre τ asocian el esfuerzo con un plano perpendicular a un eje dado; los segundos subindices designan el sentido del esfuerzo. Sobre las caras cercanas del cubo (es decir, sobre las caras alejadas del origen), los sentidos del esfuerzo son positivos si ellos coinciden con los sentidos positivos de los ejes. Sobre las caras del cubo hacia el origen, del concepto acción reacción de equilibrio, los esfuerzos postivos actúan en sentido opuesto al sentido positivo de los ejes.(Nótese que para los esfuerzos normales, al cambiar el símbolo para el esfuerzo normal de τ a σ, un solo subíndice sobre σ es suficiente para definir esta cantidad sin ambigüedad). Las designaciones para los esfuerzos mostradas en la Figura 2.31 (a) se usan ampliamente en las teorias matemáticas.[7]

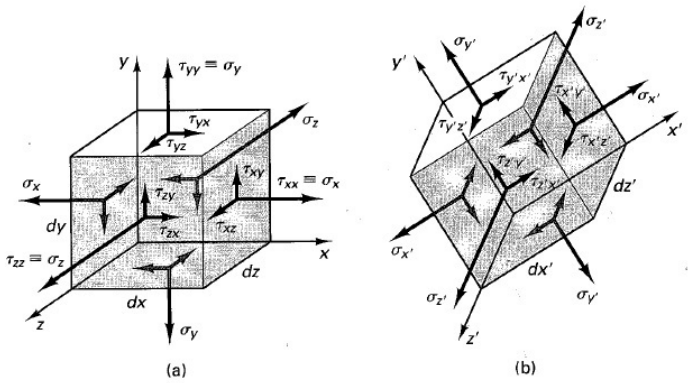


Fig. 2.31: (a) Estado general de esfuerzo actuando sobre un elemento infinitesimal en el sistema coordenado inicial. (b) Estado general de esfuerzo actuando sobre un elemento inifinitesimal definido en un sistema girado de ejes coordenados. Todos los esfuerzos tienen sentido positivo.[7]

Si en un punto se escoge un conjunto de ejes, los esfuerzos correspondientes son como se muestran en la Figura 2.31 (b). Esos esfuerzos están relacionados, pero en general no son iguales a los mostrados en la Figura 2.31 (a).[7]

Las componentes de los esfuerzos mostradas en la Figura 2.31, son $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, que representan los esfuerzos normales en las caras perpendiculares respectivamente a los ejes x, y, z y las seis componentes de los esfuerzos cortantes τ_{xy}, τ_{xz} etc.

Un examen de los símbolos para los esfuerzos en la Figura 2.31, (a) muestra que hay tres esfuerdos normales: $\tau_{xx} = \sigma_x, \tau_{yy} = \sigma_y, \tau_{zz} = \sigma_z$ y seis esfuerzos cortantes: $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$. En contraste, un vector de fuerza P tiene solo tres componentes: P_x, P_y, P_z. Éstas pueden escribirse de manera ordenada como un vector columna:[7]

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \tag{2.34}$$

En forma análoga, las componentes de esfuerzo pueden ordenarse como sigue:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{2.35}$$

Esta es una representación matricial del tensor del esfuerzo. Se trata de un tensor de segun plano que requiere dos índices para identificar sus elementos componentes. Un vector es un tensor de primer rango y un escalar es un tensor de rango cero.[7]

Ahora se deducirán algunas relaciones importantes entre las componentes del esfuerzo cortante. Considere el diagrama de cuerpo libre del pequeño cubo centrado en el punto Q (Figura 2.32).[8]

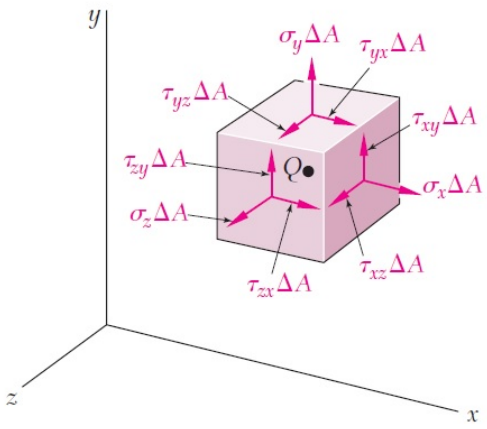


Fig. 2.32: Diagrama de cuerpo libre del cubo centrado en el punto Q[8]

Las fuerzas normales y cortantes que actúan sobre las diversas caras del cubo se obtienen multiplicando las componentes correspondientes del esfuerzo por el área a ΔA de cada cara. Primero se escribirán las tres Ecuaciones de equilibrio siguientes:[8]

$$\sum F_x = 0; \sum F_y = 0; \sum F_z = 0 \tag{2.36}$$

Como hay fuerzas iguales y opuestas a las fuerzas mostradas en la Figura 2.32 actuando sobre las caras ocultas del cubo, es claro que las Ecuaciones (2.36) se satisfacen. Considerando, ahora, los momentos de las fuerzas alrededor de los ejes x', y' y z', dibujados desde Q en direcciones

paralelas respectivamente a los ejes x, y y z, se anotarán tres ecuaciones adicionales:[8]

$$\sum M_{x'} = 0; \sum M_{y'} = 0; \sum M_{z'} = 0 \tag{2.37}$$

Utilizando una proyección sobre el plano $x'y'$ (Figura 2.33), se advierte que las únicas fuerzas con momentos alrededor del eje z distintas de cero son las fuerzas cortantes.[8]

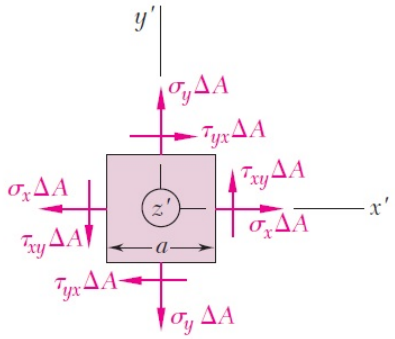


Fig. 2.33: proyección sobre el plano $x'y'$[8]

Estas fuerzas forman dos pares, uno de ellos es un momento $(\tau_{xy}\Delta A)a$, en la dirección antihoraria (positiva), y el otro es un momento $(-\tau_{yx}\Delta A)a$, en dirección horaria (negativa). La última de las tres ecuaciones (2.37) da, por lo tanto:[8]

$$\curvearrowleft \sum M_z = 0 : (\tau_{xy}\Delta A)a - (\tau_{yx}\Delta A)a$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \tag{2.38}$$

2.15.3 Relación de Poisson

Suponiendo que la carga P está dirigida a lo largo del eje x (Figura 2.34a), se tiene que $\sigma_x = P/A$, donde A es el área de la sección transversal de la barra.Por la ley de Hooke,

$$\epsilon_x = \sigma_x/E \tag{2.39}$$

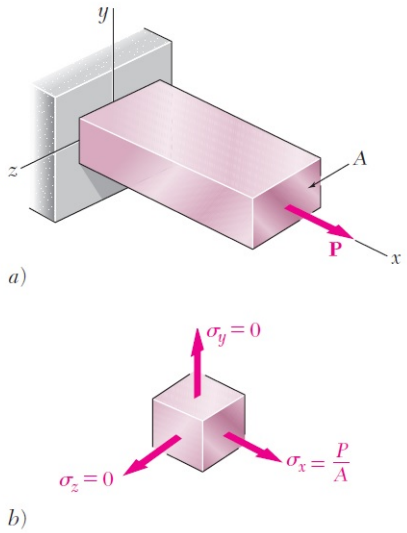


Fig. 2.34: Esfuerzos en una barra cargada axialmente.[8]

donde E es el módulo de elasticidad del material. Por lo tanto, para la carga mostrada en la Figura 2.34 debe tenerse que $\epsilon_y = \epsilon_z$. Este valor se conoce como deformación lateral. Una constante importante para un material dado es su relación de Poisson, llamada así en honor al matemático francés Siméon Denis Poisson (1781-1840), y que se denota con la letra griega ν (nu). Se define como

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \tag{2.40}$$

2.15.4 Ecuaciones difirenciales de equilibrio

Un elemento infinitesimal de un cuerpo debe estar en equilibrio. Para el caso bidimensional, el sistema de esfuerzos que actuan sobre un elemento infinitesimal $(dx)(dy)(1)$ se muestran en la Figura 2.35.[7]

En esta deducción el elemento es de espesor unitario en la dirección perpendicular al plano del papel. Note que se toma en cuanta la posibilidad de un incremento en los esfuerzos de una cara del elemento a la otra. Por ejemplo, como la razon de cambio σ_x en la dirección x es $\partial\sigma_x/\partial x$. La notación de derivada parcial tiene que usarse para diferenciar entre las direcciones.[7]

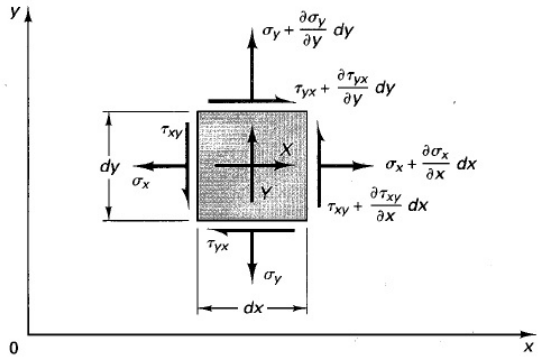


Fig. 2.35: Elemento infinitesimal con esfuerzos y fuerzas de cuerpo.[7]

Las fuerzas inerciales o de cuerpo, como las causadas por el peso o por efectos magnéticos, se designan X y Y y están asociadas con el volumen unitario del material. Con esas notaciones,

$$\sum F_x = 0 \rightarrow +; (\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x})(dx \times 1) - \sigma_x(dy \times 1) + (\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy)(dy \times 1) - \tau_{yx}(dx \times 1) + X(dxdy \times 1) = 0 \tag{2.41}$$

Simplificando y recordando que $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ se cumple, obtenemos la ecuación básica de equilibrio para la dirección x.Esta Ecuación, junto con una ánaloga para la dirección y, tienen la forma.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X = 0 \tag{2.42}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \tag{2.43}$$

El equilibrio por momento del elemento, $\sum M_z = 0$, se satisface ya que $\tau_{xy} = \tau_{yx}$. Puede demostrarse que para el caso tridimensional, una ecuación tipica de un conjunto de tres, es:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \tag{2.44}$$

Observe que en la deducción de escuaciones previas, no se han usado las propiedades mecánicas del material. Esto siginifa que esas Ecuaciones son aplicables ya sea a material elástico, plástico o viscoelástico. Esta tambien importante notar que no hay suficientes ecuaciones de equilibrio

para determinar los esfuerzos conocidos. En el caso bidimensional, dado por la Ecuación 2.42 y 2.43, hay tres esfuerzos, pero sólo tres Ecuaciones. Para el caso tridimensional, hay seis esfuerzos, pero solo tres Ecuaciones.[7]

En la teoría de elasticidad existen 15 ecuaciones diferenciales parciales con 15 ingognitas, de las cuales: tres son relaciones diferenciales de equilibrio, tres de relaciones diferenciales de deformación-desplazamiento, tres de relaciones diferenciales de esfuerzo-deformación y seis de relaciones diferenciales de compatibilidad.

Para el caso de tres dimensiones las ecuaciones diferenciales de equilibrio son:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0 \tag{2.45}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0 \tag{2.46}$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0 \tag{2.47}$$

2.15.5 Modelo de deformación

Al igual que en el modelo de esfuerzos se hacen las siguientes consideraciones:

1) El medio posee masa.

2) El medio es continuo.

3) Se estudian los cambios de posición solamente entre dos configuraciones asociadas con el medio: la configuración inicial y la configuración final.

4) No se considera en el análisis las trayectorias de los puntos desplazados del medio.

En el campo de las deformaciones y desplazamientos se tienen que cumplir una serie d ecuaciones las cuales son llamadas comunmente como ecuaciones compatibilidad. Sean: $u = u(x, y, z); v =$

$v(x,y,z); w = w(x,y,z)$ los componentes de un vector de desplazamiento y $\epsilon_x = \epsilon_x(x,y,z); \epsilon_y = \epsilon_y(x,y,z); \epsilon_z = \epsilon_z(x,y,z); \epsilon_{xy} = \epsilon_{xy}(x,y,z); \epsilon_{xz} = \epsilon_{xz}(x,y,z); \epsilon_{yz} = \epsilon_{yz}(x,y,z)$ correspondiente al campo de deformaciones.

La relación entre deformaciones y desplazamiento esta dado por las ecuaciones:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{2.48}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{2.49}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2.50}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) \tag{2.51}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) \tag{2.52}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) \tag{2.53}$$

Las deformaciones pueden ser expresadas de las siguiente forma:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{2.54}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \tag{2.55}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \tag{2.56}$$

Manupulando las ecuaciones anteriores, quedan las ecuaciones:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \tag{2.57}$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \tag{2.58}$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial x \partial z} \tag{2.59}$$

$$2\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z}) \tag{2.60}$$

$$2\frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z}) \tag{2.61}$$

$$2\frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z}) \tag{2.62}$$

Las seis ecuaciones anteriores se conocen como ecuaciones de compatibilidad.

2.15.6 Modelo deformación-esfuerzo

Considere ahora elementos estructurales sometidos a cargas que actúan en las direcciones de los tres ejes coordenados y que producen esfuerzos normales $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, todos distintos de cero (Figura 2.36). Esta condición se conoce como carga multiaxial.[8]

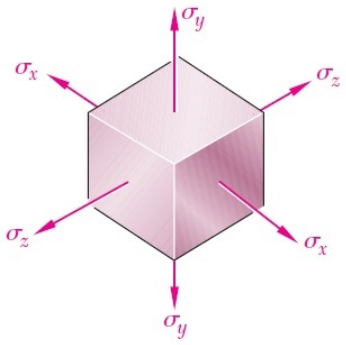


Fig. 2.36: Estado de esfuerzo para cargas multiaxiales.[8]

Sea un elemento de un material isotrópico con forma cúbica (Figura 2.37a). Puede suponerse que el lado del cubo sea igual a la unidad, ya que siempre es posible seleccionar el lado del cubo como una unidad de longitud.[8]

Bajo la carga multiaxial determinada, el elemento se deformará hasta constituir un paralelepípedo rectangular de lados iguales $1 + \epsilon_x, 1 + \epsilon_y$ y $1 + \epsilon_z$, donde ϵ_x, ϵ_y y ϵ_z. Son los valores de la deformación normal en las direcciones de los tres ejes coordenados (Figura 2.37 b).

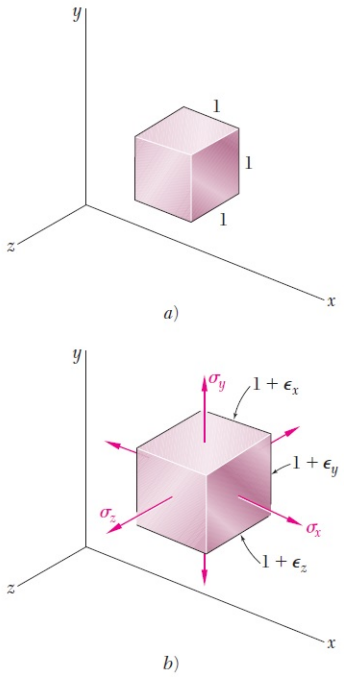


Fig. 2.37: Estado de esfuerzo para cargas multiaxiales.[8]

Deberá advertirse que, como resultado de las deformaciones de los otros elementos del material, el elemento en consideración también puede sufrir una traslación, pero en este momento sólo interesa la deformación real del elemento, y no cualquier posible desplazamiento del cuerpo rígido.[8]

Para expresar las componentes de la deformación ϵ_x, ϵ_y y ϵ_z en términos de las componentes del esfuerzo $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ se considerará por separado el efecto de cada componente de esfuerzo y se combinarán los resultados obtenidos. Considerando primero el efecto de la componente de esfuerzo σ_x ausa una deformación igual a σ_x/E en la dirección de x y deformaciones iguales a $-\nu\sigma_x/E$ en las direcciones y y z.De manera similar, si la componente σ_y y σ_z. Combinando los resultados obtenidos, se concluye que las componentes de deformación correspondientes a la carga multiaxial dada son:[8]

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \tag{2.63}$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \tag{2.64}$$

$$\epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \tag{2.65}$$

Las relaciones anteriores se conocen como la ley de Hooke generalizada para la carga multiaxial de un material isotrópico homogéneo. Como ya se indicó, los resultados obtenidos son válidos sólo si los esfuerzos no exceden el límite de proporcionalidad, y en tanto las deformaciones involucradas sean pequeñas. Además, recuerde que un valor positivo para una componente de esfuerzo signific tensión, y un valor negativo significa compresión.[8]

Para la relacion esfuerzo-deformación:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1+\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \tag{2.66}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1+\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)] \tag{2.67}$$

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1+\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \tag{2.68}$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy} \tag{2.69}$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{yz} \tag{2.70}$$

$$\tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{zx} \tag{2.71}$$

2.15.7 Modelo constitutivo de la teoría de elasticidad

El modelo constitutivo sobre medios elásticos se analiza utilizando para ello, el modelo general de esfuerzos y el modelo general de deformaciones, incluyendo además, dos restricciones adicionales, específicamente: homogeneidad e isotropía, obteniéndose con dicho análisis, un modelo representado por las ecuaciones constitutivas de elasticidad lineal para cuerpos homogéneos e isotrópicos, definiéndose para tal efecto, las constantes elásticas ya establecidas

como propiedades físicas de diversos cuerpos, y determinadas mediante leyes experimentales.[4]

Un medio se dice homogéneo si sus propiedades mecánicas son las mismas en cada parte o punto del medio considerado. En otras palabras, las propiedades elásticas son independientes del marco de referencia. Las implicaciones matemáticas que se derivan de la homogeneidad son que las funciones lineales $C_{11}, ..., C_{11}$ son constantes. Por otro lado, un cuerpo o medio es isotrópico si las deformaciones y los esfuerzos medidos en cualesquier dirección son equivalentes.[4]

Así, sea $O'x'y'z'$ un sistema ortogonal arbitrario y supóngase que se desean representar las deformaciones y los esfuerzos en dicho sistema. Entonces:

$$\sigma'_x = R'\epsilon' \tag{2.72}$$

Donde σ' es el estado total del esfuerzos, R' es el conjunto de constantes que representan las propiedades físicas y ϵ' es el conjunto de deformaciones. Entonces el modelo constitutivo es el siguiente.

$$\sigma_{x'} = C_{11}\epsilon_{x'} + C_{12}\epsilon_{y'} + C_{13}\epsilon_{z'} + C_{14}\gamma_{x'y'} + C_{15}\gamma_{y'z'} + C_{16}\gamma_{z'x'} \tag{2.73}$$

$$\sigma_{y'} = C_{21}\epsilon_{x'} + C_{22}\epsilon_{y'} + C_{23}\epsilon_{z'} + C_{24}\gamma_{x'y'} + C_{25}\gamma_{y'z'} + C_{26}\gamma_{z'x'} \tag{2.74}$$

$$\sigma_{z'} = C_{31}\epsilon_{x'} + C_{32}\epsilon_{y'} + C_{33}\epsilon_{z'} + C_{34}\gamma_{x'y'} + C_{35}\gamma_{y'z'} + C_{36}\gamma_{z'x'} \tag{2.75}$$

$$\tau_{x'y'} = C_{51}\epsilon_{x'} + C_{52}\epsilon_{y'} + C_{53}\epsilon_{z'} + C_{54}\gamma_{x'y'} + C_{55}\gamma_{y'z'} + C_{56}\gamma_{z'x'} \tag{2.76}$$

$$\tau_{z'x'} = C_{61}\epsilon_{x'} + C_{62}\epsilon_{y'} + C_{63}\epsilon_{z'} + C_{64}\gamma_{x'y'} + C_{65}\gamma_{y'z'} + C_{66}\gamma_{z'x'} \tag{2.77}$$

2.15.8 Deformación térmica

Primero considere la varilla homogénea AB con sección transversal uniforme, que descansa libremente en una superficie horizontal lisa (Figura 2.38 a). Si la temperatura de la varilla se eleva en ΔT,se observa que la varilla se alarga por una cantidad δ_T, que es proporcional tanto al

cambio de temperatura ΔT como a la longitud L de la varilla (Figura 2.38 b). Se tiene que:[8]

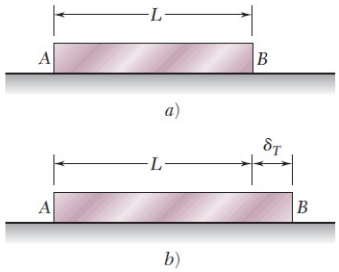


Fig. 2.38: Elongación de una varilla debido al incremento de temperatura..[8]

$$\delta_T = \alpha(\Delta T)L \tag{2.78}$$

Donde α es una constante característica del material, llamada coeficiente de expansión térmica. Como δ_T y L se expresan en unidades de longitud, α representa una cantidad por grado C o por grado F, dependiendo si el cambio de temperatura se expresa en grados Celsius o Fahrenheit.[8]

Con la deformación δ_T debe asociarse una deformación $\epsilon_T = \frac{\delta_T}{L}$. Recordando la Ecuación 2.78, se concluye:

$$\epsilon_T = \alpha(\Delta T) \tag{2.79}$$

La deformación ϵ_T se conoce como deformación unitaria térmica, ya que es causada por el cambio en la temperatura de la varilla. En el caso que consideramos aquí, no existe esfuerzo asociado con la deformación ϵ_T.[8]

El esfuerzo en la varilla debido al cambio de temperatura es ΔT es:

$$\sigma = \frac{P}{A} = -E\alpha(\delta_T) \tag{2.80}$$

Debe recordarse que el resultado obtenido aquí y la anterior observación con respecto a la ausencia de alguna deformación en la varilla sólo se aplican al caso de una varilla homogénea

con sección transversal uniforme.[8]

Las deformaciones totales mecánicas y térmicas en las direcciones x, y, z en un cuerpo cúbico $\epsilon_{tx}, \epsilon_{ty}$ y ϵ_{tz}, son:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} + \alpha(\Delta T) \tag{2.81}$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} + \alpha(\Delta T) \tag{2.82}$$

$$\epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} + \alpha(\Delta T) \tag{2.83}$$

Para un cuerpo de dos dimensiones (plano), se considera que $\epsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ al igual que los esfuerzos en el eje z, $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$, quedando las ecuaciones anteriores de la siguiente manera.

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \alpha(\Delta T) \tag{2.84}$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} + \alpha(\Delta T) \tag{2.85}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy} \tag{2.86}$$

Los esfuerzos planos estan dados por las ecuaciones:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) - \frac{E\alpha T}{1-\nu} \tag{2.87}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\epsilon_y + \nu\epsilon_x) - \frac{E\alpha T}{1-\nu} \tag{2.88}$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \tag{2.89}$$

2.16 Teoría de láminas

Para simplificar el análisis se hacen las siguientes suposiciones: 1) la lámina es simétrica; 2) las deformaciones existentes en el plano z, son constantes.

La teoría clásica de láminas asume en el modelo mecánico lo siguiente:[36]

1) La lámina es simétrica, por lo que las deformaciones y esfuerzos ocasionados por la flexión son eliminados experimentalmente.

2) La capa y la lámina obedecen a la ley de Hooke.

3) Cada capa de un material ortotrópico y su orientación en la lámina puede cambiar.

4) La unión entre capas es perfecta, infinitesimalmente delgada y no sufre deformación.

5) Como se supone un problema plano, las deformaciones normales al plano son muy pequeñas.

6) A nivel macroscópico la lámina es homogénea, elástica y lineal.

2.17 Diagrama de esfuerzo-deformación

Para obtener el diagrama de esfuerzo-deformación de un material, comúnmente se lleva a cabo un ensayo o prueba de tensión sobre una probeta del material.[10]

Uno de los ensayos mecánicos esfuerzo-deformación mas comunes es el realizado a tracción, el ensayo de tracción puede ser utilizado para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño. Normalmente se deforma una probeta hasta la rotura, con una carga de tracción que aumenta gradualmente y que aplicada uniaxialmente a lo largo de una probeta. En la Figura 2.39 se muestra una probeta de tracción normalizada. Generalmente la sección de la probeta es circular, pero también se utilizan probetas de sección rectangular. [9] Durante el ensayo, la deformación esta confinada en la región más estrecha del centro, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud. El ensayo dura varios minutos y es destructivo, o sea, la probeta del ensayo es deformada de forma permanente y a menudo rota. [9]

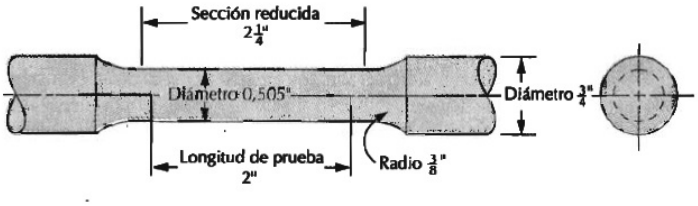


Fig. 2.39: Probeta de tracción normalizada con sección recta circular.[9]

Los diagramas esfuerzo-deformación de los materiales varían en forma considerable, por lo que diferentes ensayos de tensión llevados a cabo sobre el mismo material pueden arrojar diferentes resultados, dependiendo de la temperatura de la probeta y de la velocidad de aplicación de la carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes entre los diagramas esfuerzo-deformación de distintos grupos de materiales, y dividir los materiales en dos amplias categorías con base en estas características. Habrá así materiales dúctiles y materiales frágiles.[10]

Los materiales dúctiles, como el acero estructural, así como muchas aleaciones de otros metales, se caracterizan por su capacidad de fluir a temperaturas normales. Al someterse la probeta a una carga que aumenta, su longitud se incrementa primero linealmente con la carga y a una tasa muy lenta. Así, la porción inicial del diagrama esfuerzo-deformación es una línea recta con una pendiente pronunciada (Figura 2.40). No obstante, después de alcanzar un valor crítico σ_Y del esfuerzo, la probeta experimenta una gran deformación con un incremento relativamente pequeño de la carga aplicada. Esta deformación es causada por el deslizamiento del material a lo largo de superficies oblicuas y se debe sobre todo a esfuerzos cortantes.Después de haber alcanzado un cierto valor máximo de carga, el diámetro de una porción del espécimen comienza a disminuir, debido a la inestabilidad local (Figura 2.40a). Este fenómeno se conoce como estricción. Después de que comienza la estricción, son suficientes cargas algo menores para lograr que la probeta se alargue aún más, hasta que finalmente se fracture. [10]

El esfuerzo σ_Y en el que comienza la fluencia se llama la resistencia o punto de fluencia o cedencia del material, el esfuerzo σ_U que corresponde a la máxima carga aplicada al material

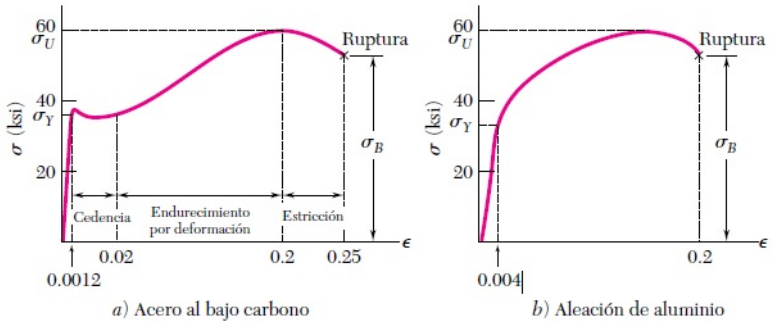


Fig. 2.40: Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos.[10]

se conoce como la resistencia última y el esfuerzo σ_B correspondiente a la fractura se denomina resistencia a la fractura.

2.18 Torre del aerogenerador

La torre es uno de los principales componentes de una turbina de eje horizontal. Esta circunstancia es a la vez una ventaja y una desventaja. La desventaja viene a ser los costes elevados en los que está envuelta, que puede constituir alrededor del 20 % del coste total de la turbina.[37]

Los parámetros importantes para el diseño y fabricación de una torre de aerogenerador se enlistan a continuación:

1) Altura.

2) Rigidez.

3) Costo.

Para el diseño estructural de la torre se deben de considerar ciertos aspectos como lo son:

1) Resistencia máxima: La máxima resistencia de la torre se determina mediante un cálculo de cargas estáticas debidas al peso de la propia torre y de todos los elementos situados en su parte superior (rotor eólico y góndola). Además se debe considerar el momento flector que soporta la base de la torre debido a las fuerzas aerodinámicas de empuje sobre el rotor.

Las condiciones de empuje más desfavorables se producen, en las turbinas con control de paso de pala, cuando se alcanza la velocidad de giro máxima y la velocidad del viento es la nominal. Por el contrario, las mayores fuerzas de empuje en turbinas con control aerodinámico pasivo se presentan para velocidades del viento superiores a la nominal. Otro caso de carga que se debe considerar en el diseño de la torre es la situación de viento extremo con la máquina parada.[37]

2) Rigidez: La estructura precisa unos requisitos de rigidez necesaria que evite los desplazamientos que pueden ocasionar las cargas. Esta rigidez es proporcionada a la estructura por una combinación de factores; en primer lugar como característica intrínseca del material, el acero es un material bastante rígido. En segundo lugar, el espesor de la estructura le confiere rigidez cuanto mayor sea este.[37]

3) Resonancia: Es importante hacer un estudio de la frecuencia natural de la estructura para evitar que ésta coincida con alguna otra frecuencia como la del giro del rotor, por ejemplo, y entre en resonancia. Los modos de vibración más importantes de la torre son el 1º y 2º modo de vibración de flexión lateral. Como referencia, la frecuencia natural correspondiente a este 1º modo de vibración para una torre de 50 m de altura puede variar en el entorno de 0.5 a 1 Hz.[37]

4) Pandeo: Uno de los problemas de diseño más importantes que se deben considerar, en especial en las torres de altura elevada diseñadas con rigideces reducidas (torres muy esbeltas), es el fenómeno de pandeo o la flexión lateral que puede sufrir la estructura. Para evitar la aparición de este fenómeno, es necesario aumentar la rigidez de la estructura aumentando el grosor de la chapa de acero.[37]

5) Resistencia a la fatiga: Las cargas variables con el tiempo son muy significativas cuando se calcula la resistencia a fatiga de la torre. Un cálculo estático no es suficiente para determinar el comportamiento estructural del componente a largo plazo. Como estas estructuras están diseñadas para durar bastantes años, es importante que se realice este tipo de estudio y así poder evitar que se rompa la torre por fatiga.[37]

2.19 Fuerzas que intervienen en un aerogenerador

Las principales fuerzas que intervienen en un aerogenerador se muestran en la Figura 2.41

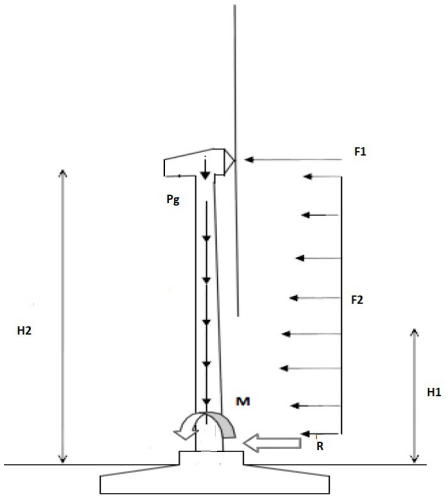


Fig. 2.41: Principales fuerzas que intervienen en un AG.

Donde:

1) F_1 es la fuerza ejerce el viento sobre el rotor.

2) P_g se refiere al peso del AG.

3) F_2 es la fuerza que ejerce el viento sobre la torre y se modela como una fuerza uniformente distribuida sobre la torre.

4) H_1 es la altura que existe entre a la base del AG y el rotor de este.

5) H_2 es la distancia en la que actua la fuerza F_2 cuando se sustituye por una carga concentrada.

6) M es el momento generado por las fuerzas.

7) R es la reacción que se presenta en la base del AG.

2.19.1 Fuerza del viento sobre el rotor

La expresión de la fuerza de empuje mecánica del rotor eólico, constituyen lo que se denomina actuaciones de la aeroturbina, y se puede calcular de forma aproxima mediante la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{1}{2}\rho_{aire}\pi v^2 R^2 C_T(\lambda) \tag{2.90}$$

1) F_R: Fuerza del viento ejercidad sobre el rotor en N.

2) ρ_{aire}: Densidad del aire en $\frac{Kg}{m^3}$

3) v: Velocidad del aire en m/s

4) R: Radio del rotor en m

5) $C_T(\lambda)$: Coeficiente de empuje en función de (λ)

λ esta dado por la expresión:

$$\lambda = \frac{\Omega R_{Rotor}}{v} \tag{2.91}$$

1) Ω: es la velocidad angular del rotor en rad/s

2) v: Velocidad del viento en m/s

3) R: Radio del rotor en m

De acuerdo con el valor de λ se coteja en la Figura 2.42 el valor de $C_T(\lambda)$.

En nuestro caso con el objetivo de ser lo más precisos posible ya que esta fórmula es una simple aproximación en la que no se tienen muchos factores en cuenta, se ha determinado esta fuerza a través de una página encargada del diseño de un programa para el cálculo de fuerzas sobre aerogeneradores.

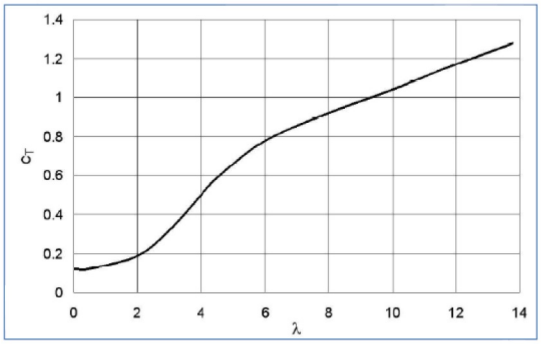


Fig. 2.42: Coeficiente de empuje en función de λ.

2.19.2 Fuerza del viento sobre la torre del AG

La fuerza del viento en un cilindro se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$F_v = \frac{1}{2}\rho_{aire} D_{cilindro} v^2 C_e \tag{2.92}$$

Donde:

1) F_v: Es la Fuerza del viento ejercida en el cilindro en función de la altura (N/m)

2) ρ_{aire}: se refiere a la densidad del aire en $\frac{Kg}{m^3}$

3) v: Es la velocidad del aire en m/s

4) $D_{cilindro}$: Se conoce como el diametro del cilindro en m

5) $C_T(\lambda)$: Es el coeficiente de forma (λ)

El coeficiente de forma se puede ver en la Figura 2.43.

	Structures	*Shape coefficient*
→ D	Hollow hemisphere, concavity to wind	1.40
→ ⌓	Hollow hemisphere	0.35
→ C	Hollow or solid hemisphere, concavity to leeward	0.40
→ D |	Solid hemisphere and circular disc	1.20
→ ⌒	Hemisphere on horizontal plane	0.50

Fig. 2.43: Coeficiente de forma.

2.20 Esfuerzos en vigas

En el análisis de vigas se tienen presente dos tipos de esfuerzos, el esfuerzo normal, comúnmente denotado con la letra griega σ y el esfuerzo cortante denotado con la letra griega τ.

Con frecuencia, en el diseño se adopta el supuesto de una distribución uniforme del esfuerzo. En este caso el resultado se llama tensión pura, compresión pura o cortante puro, dependiendo de cómo se aplique la carga externa al cuerpo bajo estudio. Algunas veces se emplea la palabra simple en lugar de puro o pura para indicar que no hay otros efectos que compliquen el estado. Una barra en tensión es un ejemplo típico. En este caso, una carga de tensión F se aplica mediante pasadores a los extremos de la barra. La suposición de esfuerzo uniforme significa que si se corta la barra en una sección alejada de los extremos y se remueve una parte, se puede reemplazar su efecto aplicando una fuerza uniformemente distribuida de magnitud σA al extremo cortado. Por ello se dice que el esfuerzo σ está uniformemente distribuido y se calcula mediante la ecuación.[11]

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.93}$$

Este supuesto de la distribución uniforme del esfuerzo requiere que:[11]

1) La barra sea recta y de un material homogéneo.

2) La línea de acción de la fuerza pase por el centroide de la sección.

El uso de la Ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{2.94}$$

para un cuerpo, digamos, un tornillo sometido a cortante, también supone una distribución uniforme del esfuerzo. En la práctica es muy difícil obtener una distribución uniforme del esfuerzo cortante. La ecuación se incluye porque hay ocasiones en las que es necesario utilizar este supuesto.[11]

2.20.1 Esfuerzos normales en vigas a flexión

Las ecuaciones para representar los esfuerzos normales en flexión en vigas rectas se basan en los siguientes supuestos:[11]

1) La viga se somete a flexión pura; esto significa que la fuerza cortante es nula y que no hay cargas de torsión o axiales presentes.

2) El material es isotrópico y homogéneo.

3) El material cumple con la ley de Hooke.

4) Inicialmente la viga es recta, con una sección transversal constante en toda su longitud.

5) La viga tiene un eje de simetría en el plano de la flexión.

5) Las proporciones de la viga son tales que fallaría ante la flexión, en vez de fallar por aplastamiento, corrugación o pandeo lateral.

5) Las secciones transversales de la viga permanecen planas durante la flexión.

En la Figura 2.44 se representa una porción de una viga recta sometida al momento flexionante positivo M mostrado por la flecha curva que representa la acción física del momento junto con una flecha recta que indica el vector momento. El eje x coincide con el eje neutro de la sección, y el plano xz, que contiene los ejes neutros de todas las secciones transversales, se llama plano neutro. Los elementos de la viga que coinciden con este plano tienen un esfuerzo cero. La localización del eje neutro con respecto a la sección transversal es coincidente con el eje centroidal de la sección transversal.[11]

La distribución del esfuerzo normal debido a la flexión, se puede ver en la Figura 2.45, nótese que el esfuerzo normal varia linealmente con la distancia del eje neutro, a la distribución de esfuerzo mostrada anteriormente se le conoce como escuadrilla.

El esfuerzo a flexión esta dado por la Ecuación:

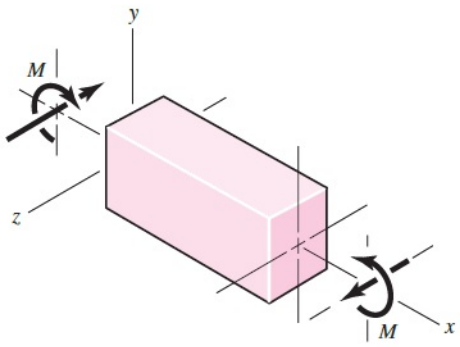


Fig. 2.44: Viga recta en flexión positiva.[11]

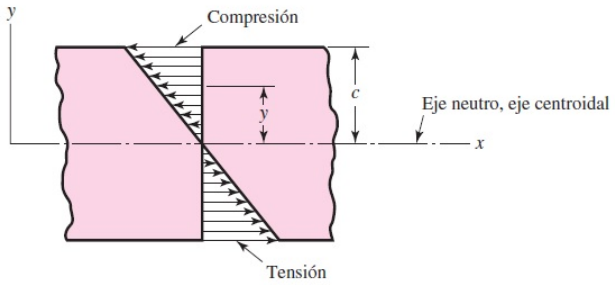


Fig. 2.45: Esfuerzo del flexión.[11]

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \tag{2.95}$$

donde I es el segundo momento de área alrededor del eje z.

De acuerdo a la Figura 2.45, el esfuerzo máximo se alcanza cuando y tiene la longitud mas grande medida respecto al eje centroidal o eje neutro. Cuando y es máxima el esfuerzo σ_x es máximo y la Ecuación 2.95 queda como:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \tag{2.96}$$

donde c es el valor máximo de y, el signo + se utiliza para esfuerzo en tensión y el signo − para esfuerzo en compresión. El valor de I se determina de acuerdo a la forma de la sección transversal de la viga. El esfuerzo cortante en vigas de sección transversal estándar se muestra en la Figura 2.46.

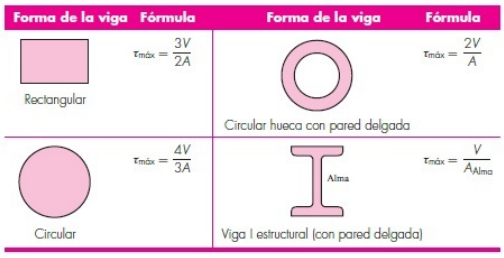


Fig. 2.46: Formulas de esfuerzo cortante máximo debido a flexión.[11]

2.21 Transformaciones de esfuerzo

El estado más general de esfuerzo en un punto dado Q puede representarse por seis componentes. Tres de éstas,σ_x, σ_y y σ_z definen los esfuerzos normales ejercidos sobre las caras de un elemento cúbico centrado en Q y con la misma orientación de los ejes coordenados (Figura 2.47 a)) y las otras tres,τ_{xy}, τ_{yz} y τ_{zx} las componentes de los esfuerzos cortantes del mismo elemento. Como se observó entonces, el mismo estado de esfuerzos se representará mediante un conjunto diferente de componentes si se giran los ejes (Figura 2.47 b)).[8]

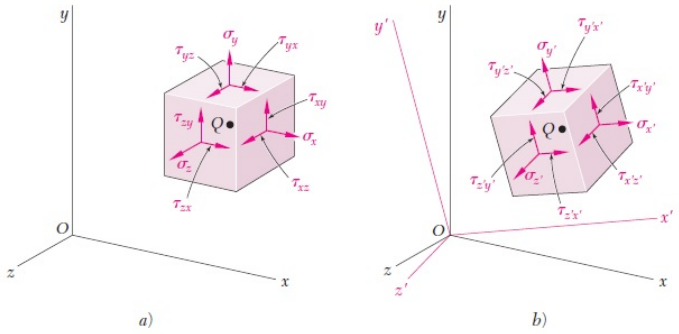


Fig. 2.47: Estado general de esfuerzo en un punto Q [8]

2.21.1 Círculo de Mohr del esfuerzo plano

Dado un estado de esfuerzo plano (Figura 2.48) se puede contruir el circulo de Mohr:
Este método se basa en consideraciones geométricas simples y no requiere el uso de ecuaciones especializadas. Aunque fue diseñado para obtener soluciones gráficas, se puede aplicar muy bien empleando una calculadora. Considere un elemento cuadrado de un material sometido a esfuerzo plano (Figura 2.49 a) y sean σ_x, σ_y y σ_z las componentes del esfuerzo ejercido sobre el elemento.

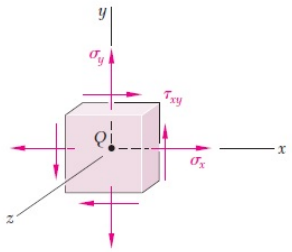


Fig. 2.48: Estado general de esfuerzo plano en un punto Q [8]

Dibuje un punto X de coordenadas σ_x y $-\tau_{xy}$ y un punto Y de coordenas σ_y $+\tau_{xy}$ (Figura 2.49 b). Si τ_{xy} es positivo como se muestra en la Figura 2.49 a) el punto X está situado debajo del eje σ y el punto Y encima como se muestra en la Figura 2.49 b). Si τ_{xy} es negativo, X se situa encima del eje σ y Y debajo Uniendo X y Y mediante una línea recta se define el punto C de intersección de la línea XY con el eje σ y se dibuja el círculo de centro en C y diámetro XY. Al observar que la abscisa de C y el radio del círculo son respectivamente iguales a las cantidades σ_{prom} y R.

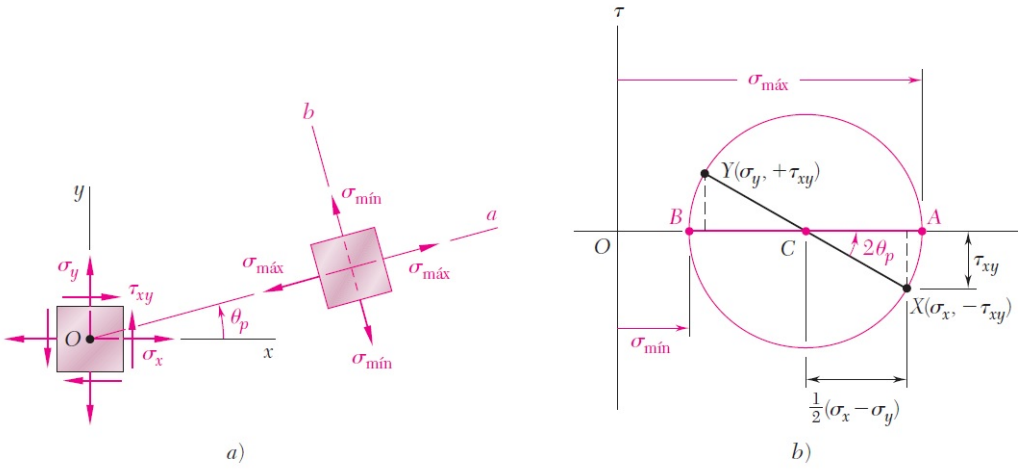


Fig. 2.49: Circulo de Mohr [8]

Si se escoge un sistema de ejes rectangulares y se grafica un punto M de abscisa $\sigma_{x'}$ y ordenadas $\tau_{x'y'}$ para cualquier valor de θ, los puntos así obtenidos estarán situados en un círculo. Las ecuaciones que permiten construir el circulo Mohr (veáse Figura 2.50) se presentan a continuación. El centro del círculo de Mohr esta dado por la Ecuación 2.97:

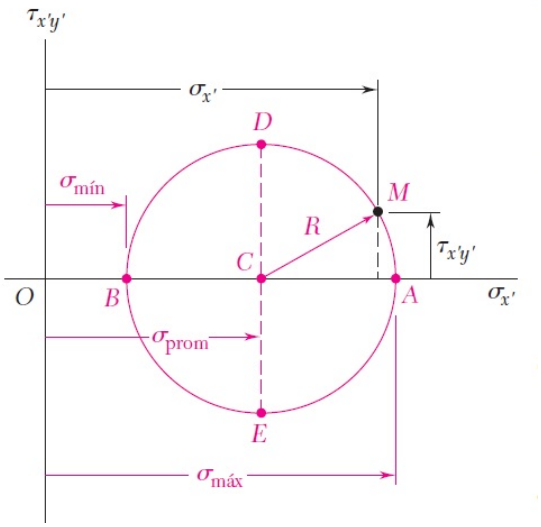


Fig. 2.50: Relaciones de transformación de esfuerzo [8]

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \tag{2.97}$$

El valor del radio se calcula con ayuda de la Ecuación 2.98:

$$R = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} \tag{2.98}$$

Los puntos A y B dela Figura 2.50 corresponden al valor máximo del esfuerzo normal $\sigma_{x'}$ mientras que al punto B corresponde a su valor mínimo. Además, ambos puntos tienen un valor nulo del esfuerzo cortante $\tau_{x'y'}$. Asi, los valores θ_p del parámetro θ que correspondena los puntos A y B pueden obtenerse con la Ecuación 2.99:

$$tan2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \tag{2.99}$$

Esta ecuación define dos valores $2\theta_p$ que difieren en 180^o y, por tanto, dos valores θ_p que difieren en 90^o. Cualquiera de estos valores puede usarse para determinar la orientación del elemento correspondiente (Figura 2.51). Los planos que contienen las caras del elemento obtenido se llaman planos principales de esfuerzo en el punto Q, y los valores correspondientes σ_{max} y σ_{min} del esfuerzo normal ejercido sobre estos planos son los esfuerzos principales en Q.[8]

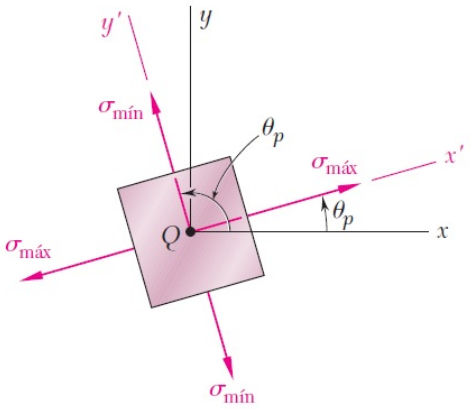


Fig. 2.51: Esfuerzos principales [8]

Los valores de σ_{max} y σ_{min} se calculan con la Ecuación 2.100:

$$\sigma_{max,min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} \tag{2.100}$$

A menos que sea posible decir por inspección cuál de los dos planos se somete a σ_{max} y cual a σ_{min}, es necesario sustituir uno de los valores de θ_p para determinar cuál de los dos corresponde al valor máximo del esfuerzo normal. Refiriéndose de nuevo al círculo de la Figura 2.50, se observa que los puntos D y E, localizados en el diámetro vertical del círculo, corresponden al mayor valor numérico del esfuerzo $\tau_{x'y'}$ Puesto que la abscisa de los puntos D y E es $\sigma_{prom} = (\sigma_x + \sigma_y)/2$ los valores θ_s del parámetro θ que corresponden a estos puntos se obtienen con la Ecuación 2.101:[8]

$$tan2\theta_s = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \tag{2.101}$$

Esta ecuación define dos valores θ_s que difieren en 180^o, y por tanto dos valores de us que difieren en 90^o.Cualquiera de estos valores puede usarse para determinar la orientación del elemento correspondiente al esfuerzo cortante máximo (Figura 2.52). Al observar en la Figura 2.50 que el valor máximo del esfuerzo cortante es igual al radio R del círculo y, recordando la segunda de las Ecuaciones (2.97 y 2.98), se tiene:[8]

$$\tau_{max} = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + (\tau_{xy})^2} \tag{2.102}$$

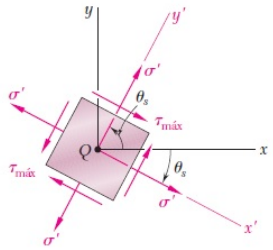


Fig. 2.52: Esfuerzo cortante máximo [8]

Comparando las Ecuaciones 2.99 y 2.101 se nota que $tan2\theta_s$ es el inverso negativo de $tan2\theta_p$, lo cual significa que los ángulos $2\theta_s$ y $2\theta_p$ difieren en 90^o y, por tanto, que θ_s y θ_p difieren en 45^o.Así se concluye que los planos de esfuerzo cortante máximo están a 45^o de los planos principales. Se debe estar consciente de que el análisis sobre la transformación de esfuerzo plano se ha limitado a las rotaciones en el plano de esfuerzo.[8]

2.22 Límite de resistencia a la fatiga

En la actualidad, determinar los límites de resistencia mediante ensayos a la fatiga es una rutina, aunque resulta un procedimiento extenso. En general, para los límites de resistencia los ensayos de esfuerzo se prefieren a los ensayos de deformación. Para el diseño preliminar y de prototipos, así como para algunos análisis de falla, se requiere un método rápido para estimar los límites de resistencia.[11]

En el caso de los aceros,se estimará el límite de resistencia como:

$$S_e^{'} = 0{,}5S_{ut} \longrightarrow S_{ut} \leq 200Kpsi(1400MPa) \tag{2.103}$$

Donde S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima.

2.23 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Se ha visto que la muestra para el ensayo en máquina rotativa en el laboratorio para determinar los límites de resistencia a la fatiga se prepara con mucho cuidado y se ensaya bajo condiciones muy controladas. No es posible esperar que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento

mecánico o estructural iguale los valores que se obtuvieron en el laboratorio. Algunas diferencias incluyen[11]

1) Material: composición, base de falla, variabilidad.

2) Manufactura: método, tratamiento térmico, corrosión superficial por frotamiento, acabado superficial, concentración de esfuerzo.

3) Entorno: corrosión, temperatura, estado de esfuerzos, tiempos de relajación

Marin identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura y varios otros puntos.[11]

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e^{'} \tag{2.104}$$

donde:
K_a:factor de modificación de la condición superficial
K_b:factor de modificación del tamaño
K_c:factor de modificación de la carga
K_d:factor de modificación de la temperatura
K_e:factor de confiabilidad
K_f:factor de modificación de efectos varios
$S_e^{'}$: límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
S_e: límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.[11]

Factor de modificación de la condición superficial K_a

La superficie de una muestra de viga rotativa está muy pulida y además se le da un pulido final en la dirección axial para eliminar cualquier rayadura circunferencial.

$$K_a = aS_{ut}^b \tag{2.105}$$

S_{ut} es la resistencia mínima a la tensión y los valores de a y b se encuentran en la Figura 2.53

Acabado superficial	Factor a S_{ut}, kpsi	Factor a S_{ut}, MPa	Exponente b
Esmerilado	1.34	1.58	–0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	–0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	–0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	–0.995

Fig. 2.53: Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin [11]

Factor de tamaño K_b

Los resultados para flexión y torsión pueden expresarse como:

$$0{,}91d^{-0{,}157} \longrightarrow 2 < d \leq 10 pulgadas \tag{2.106}$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual $K_b = 1$

Factor de temperatura K_c

Cuando se realizan los ensayos de fatiga con carga de flexión rotatoria, axial (empujar y jalar) y de torsión, los límites de resistencia a la fatiga difieren con S_{ut}

$$K_c = 1 \longrightarrow F \tag{2.107}$$

$$K_c = 0{,}85 \longrightarrow A \tag{2.108}$$

$$K_c = 0{,}59 \longrightarrow T \tag{2.109}$$

F: Flexión

A: Axial

T: Torsión

Factor de temperatura K_d

Cuando las temperaturas de operación son menores que la temperatura ambiente, la fractura frágil es una posibilidad fuerte, por lo que se necesita investigar primero. Cuando las temperaturas de operación son mayores que la temperatura ambiente, primero se debe investigar la fluencia porque la resistencia a ésta disminuye con rapidez con la temperatura.Cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico en un material que opera a temperaturas elevadas, por lo que también se sugiere considerar este factor. Por último, puede ser cierto que no existe límite a la fatiga en el caso de materiales que operan a temperaturas elevadas.[11]

En la Figura 2.54 se muestra los factores a la temperatura

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fig. 2.54: Factor de temperatura [11]

Cuando se toma en cuenta la temperatura surgen dos tipos de problemas. Si se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa a temperatura ambiente, entonces se emplea

$$K_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \tag{2.110}$$

Factor de confiabilidad K_e

El factor de modificación de la confiabilidad aplicable para esto puede escribirse como

$$K_e = 1 - 0{,}8Z_a \tag{2.111}$$

donde Z_a se presenta en la Figura 2.55

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fig. 2.55: Factores de confiabilidad K_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga [11]

Factor de efectos varios K_f

Aunque el factor K_f tiene el propósito de tomar en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, en verdad significa un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de K_f no siempre están disponibles.

2.24 Control de potencia

En general, los aerogeneradores modernos de eje horizontal se diseñan para trabajar con ciertas velocidades del viento. La primera es la llamada velocidad de conexión y la segunda la velocidad de corte. Básicamente, el aerogenerador comienza produciendo energía eléctrica cuando la velocidad del viento supera la velocidad de conexión y, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada es mayor, siguiendo la llamada curva de potencia. Asimismo, es necesario un sistema de control de las velocidades de rotación para que, en caso de vientos excesivamente fuertes, que podrían poner en peligro la instalación, haga girar a las palas de la hélice de tal forma que éstas presenten la mínima oposición al viento, con lo que la hélice se detendría. Para aerogeneradores de gran potencia, algunos tipos de sistemas pasivos, utilizan

características aerodinámicas de las palas que hacen que aún en condiciones de vientos muy fuertes el rotor se detenga. Esto se debe a que él mismo entra en un régimen llamado "pérdida aerodinámica".

2.25 Diseño de control

El diseño de sistemas de control para los aerogeneradores de velocidad variable resulta complicado ya que, además de las variaciones en la magnitud y dirección del viento, se deben considerar cambios abruptos en la carga eléctrica, fuertes no linealidades, varias restricciones y gran interacción entre sus variables. [12]

Diversas técnicas de control multivariable se han implementado en los aerogeneradores, como son: Control con Variación Paramétrica Lineal, Adaptativo, Óptimo LQG , PID descentralizado, Predictivo. [12]

El sistema de control (SC) de un aerogenerador constituye el cerebro de la máquina. Su objetivo es el de garantizar la operación segura y eficiente del TGE, asi como salvaguardar su integridad fisica. En forma general, el SC de un aerogenerador contempla un sistema de control sequential (SCS) y un sistema de control regulatorio (SCR). [13]

2.26 Zonas de operación de aerogeneradores

Los aerogeneradores tienen principalmente cuatro zonas o regiones de operación. La primera zona es el arranque o la puesta en marcha en la que se busca la máxima eficiencia aerodinámica girando el ángulo pitch de las palas al mínimo y una baja captura de energía del generador debida a espectros de velocidad de viento bajos. La segunda zona se caracteriza por ser de transición, en la que se busca una buena eficiencia y una transición suave hacia las zonas 1 y 3. Los espectros de velocidad de viento son medios.[17]

La tercera zona el generador absorbe el máximo de potencia del viento y el control se basa en el

giro del ángulo pitch de las palas. El objetivo del control en esta zona es estabilizar la velocidad angular y evitar las perturbaciones de viento. Por un lado, debe minimizar los esfuerzos que soportan las palas mediante un ajuste del ángulo pitch y por otro lado evitar que pequeñas variaciones de viento disminuyan la energía capturada del viento. El espectro de velocidad de viento en esta zona es alto. Por último, la cuarta zona se caracteriza por un espectro de velocidad de viento extremo. La energía del viento excede la carga que puede soportar el aerogenerador en funcionamiento y por lo que debe pararse. Las distintas zonas pueden verse en la figura 2.56.[17]

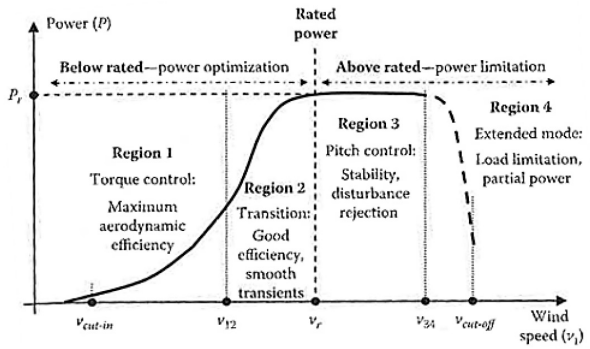


Fig. 2.56: Zonas de operación en aerogeneradores

2.27 La influencia de la velocidad del aire

La densidad del aire presenta variaciones en función de la humedad, la temperatura y la presión. En la Figura 2.57 puede apreciarse el porcentaje de variación de la potencia eólica en la relación a la temperatura y a la presión. Se ha tomado como referencia una temperatura de 25 ºC de y 1 atm de presión en donde la densidad del aire es 1.185 Kg/m^3. Por un lado, según aumenta la temperatura la densidad del aire disminuye por lo que en climas cálidos, a igualdad de velocidad de viento, la energía eólica es menor. Por otro lado, la densidad del aire disminuye al disminuir la presión. La presión del aire es menor según subimos en altura por lo que en lugares elevados la energía eólica es menor.[17]

2.28 Baterías

Según la real academia española, una batería es un acumulador o un conjunto de acumuladores de electricidad. Es decir, es un dispositivo que está constituido por una o más celdas

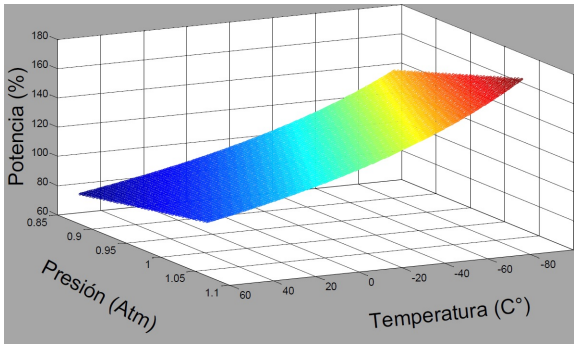


Fig. 2.57: Variación (%) de la potencia eólica debido a la temperatura y la presión atmosférica.

electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad.

En la actualidad se encuentra una gran variedad de equipos activados por baterías, lo que refleja la versatilidad y conveniencia de este tipo de fuentes de energía eléctrica.[38]

2.28.1 Tipos de baterías

Existen dos grandes grupos de baterías o pilas. Las baterías primarias, cuya carga no puede renovarse cuando se agota (se debería reponer la sustancia química que la conforma) y las baterías secundarias, que sí se pueden recargar sometiéndolas al paso de una corriente eléctrica en el sentido inverso al sentido en el que la corriente de la pila fluye normalmente.[39] El campo de aplicación de las baterías primarias se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas, y de ahí que sean de tamaño pequeño[39]. Baterías primarias comunes son las de carbono-zinc o LeClanche, el alcalino manganeso, las de mercurio, las de magnesio, y las de plata-zinc.[39] Las principales baterías secundarias son las de níquel-cadmio, plomo-ácido sulfúrico, plata-zinc, plata-cadmio, níquel-hierro o de Edison y níquel-zinc [38]. Las baterías secundarias, en cambio, se comercializan en un amplio margen de potencias y capacidades, desde unos cientos de miliamperios-hora hasta capacidades de varias decenas de amperios-hora [39].

Resistencia interna: Consiste en un concepto que ayuda a modelar en forma de resistencia todas las consecuencias eléctricas de las complejas relaciones químicas que se producen dentro de una batería. Al ser un concepto teórico, no se puede medir directamente de la batería, pero se puede

calcular mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. Cuando se aplica una carga a la batería, la resistencia interna de ésta se puede calcular con cualquiera de las dos ecuaciones que se presentan a continuación:[39]

$$R_B = \frac{V_o - V}{I} \tag{2.112}$$

Donde:

R_B =Resistencia interna de la batería.

V_o = Tensión de vacío de la batería.

V =Tensión de la batería con la carga.

I =Intensidad suministrada por la batería.

La resistencia interna no es un parámetro fijo, sino que varía con la edad de la batería. La mayoría de baterías comerciales tienen una resistencia interna del orden de 1 Ohm. [39]

Carga de baterías

La carga se producirá siempre que se le aplique a la batería un potencial de corriente continua mayor que el suyo. Durante el proceso de carga, se debe de introducir la cantidad de carga necesaria en Ampers/Hora, para que la batería quede completamente cargada. [38]

Carga a tensión constante

Los acumuladores se pueden cargar con corrientes iniciales muy altas si se aplica una tensión constante (tensión de gasificación) en bornes de la batería. Este método produce una carga rápida, pero establece esfuerzos enormes a la batería y al aparato de carga.

Carga a corriente constante

En este método el equipo de carga mantiene constante la intensidad de corriente hasta alcanzar la tensión de gasificación (voltaje al cual reaccionan los químicos). [38]

2.29 Leyes de Kirchhoff

La corriente se relaciona con la carga que fluye por un elemento de circuito, en tanto que la tensión constituye una medida de la diferencia de energía potencial entre los extremos del elemento. En la teoría de circuitos, la tensión sólo tiene un valor único.

2.29.1 Ley de corrientes de Kirchhoff

Esta ley dice que "La suma algebraica de las corrientes que entran a cualquier nodo es cero" [40]. Es decir, Esta ley representa un enunciado matemático del hecho de que la carga no se acumula en un nodo. Un nodo no es un elemento de circuito, y ciertamente no puede almacenar, destruir o generar carga. En consecuencia, las corrientes deben sumar cero (ver Figura 2.58).

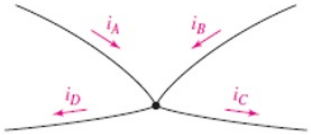


Fig. 2.58: Nodo que ilustra la aplicación de la ley de corrientes de Kirchhoff.

Como muestra la Figura 2.58 hay corrientes que se dirigen al nodo (entran) y hay corrientes que se van del nodo (salen). Considerando esto la suma algebraica de las cuatro corrientes que entran al nodo debe ser cero:

$$i_a + i_b + (-i_c) + (-i_d) = 0 \tag{2.113}$$

Despejando:

$$i_a + i_b = i_c + i_d \tag{2.114}$$

Es decir la suma de las corrientes que entran es igual a las corrientes que salen del nodo.

2.29.2 Ley de voltajes de Kirchhoff

La ley dice que "la suma algebraica de las tensiones alrededor de cualquier trayectoria cerrada es cero".[40]

En la Figura 2.59, si llevamos una carga de $1C$ de A a B a través del elemento 1, los signos de polaridad de referencia de v1 muestran que se utilizaron v1 joules de trabajo.[40]

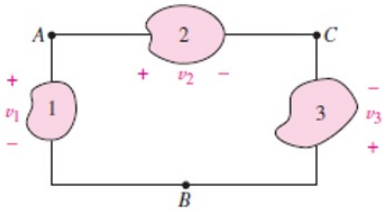


Fig. 2.59: La diferencia de potencial entre los puntos A y B es independiente de la trayectoria elegida.

Ahora bien, si, en vez de eso, elegimos proceder de A a B por el nodo C, entonces consumiremos $V_2 - V_3$ joules de energía. El trabajo realizado, sin embargo, es independiente de la trayectoria en un circuito, por lo que cualquier ruta debe conducir al mismo valor de la tensión. En otras palabras,

$$V_1 = V_2 - V_3 \tag{2.115}$$

Un método que propicia menos errores de escritura de ecuaciones, en comparación con otros, consiste en moverse mentalmente alrededor de la trayectoria cerrada en la dirección de las manecillas del reloj y escribir de manera directa la tensión de cada elemento a cuya terminal (+) se entra, y después expresar el negativo de cada tensión que se encuentre primero en el signo (−). Aplicando lo anterior al lazo sencillo de la figura, tenemos

$$-V_1 + V_2 - V_3 = 0 \tag{2.116}$$

2.30 Capacitores

Un capacitor está compuesto por dos placas conductoras separadas por un aislante (o dieléctrico) como se muestra en la Figura 2.60 Un capacitor es un elemento pasivo diseñado para almacenar energía en su campo eléctrico (Figura 2.61). Junto con los resistores, los componentes eléctricos más comunes son los capacitores, los cuales son de amplio uso en electrónica, comunicaciones, computadoras y sistemas de potencia. Por ejemplo, se emplean en los circuitos sintonizadores de radiorreceptores y como elementos de memoria dinámica en sistemas de computación.

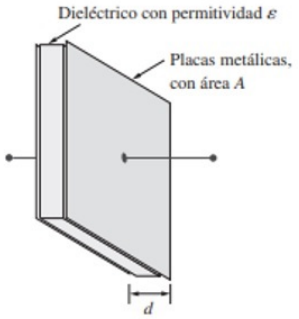


Fig. 2.60: Capacitor usual.

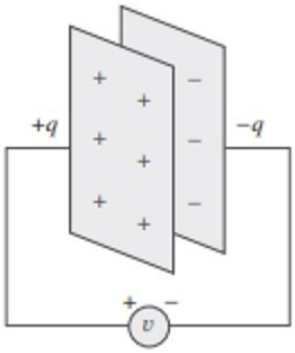


Fig. 2.61: Capacitor usual.

La capacitancia es la proporción entre la carga en una placa de un capacitor y la diferencia de tensión entre las dos placas, medida en faradios (F) y su símbolo se muestra en la Figura 2.62. Se define la capacitancia C por medio de la relación corriente-tensión:

$$i = C\frac{dv}{dt} \tag{2.117}$$

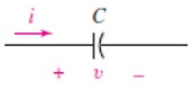


Fig. 2.62: Símbolo eléctrico y convenciones de corriente-tensión de un capacitor.

donde v ei satisfacen las convenciones de un elemento pasivo, como se muestra en la Figura 2.62.La tensión del capacitor se expresaría en términos de la corriente que integra la ecuación anterior. Primero obtenemos:

$$dv = \frac{1}{C} i(t)dt \tag{2.118}$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int idt + k \tag{2.119}$$

2.31 Inductores

Un inductor es un elemento pasivo diseñado para almacenar energía en su campo magnético. Los inductores encuentran numerosas aplicaciones en sistemas electrónicos y de potencia. Se usan en alimentaciones de potencia, transformadores, radios, televisores, radares y motores eléctricos. Todos los conductores de corriente eléctrica tienen propiedades inductivas y pueden considerarse inductores. Pero para aumentar el efecto inductivo, un inductor práctico suele formarse en una bobina cilíndrica con muchas vueltas de alambre conductor, como se observa en la Figura 2.63.[40]

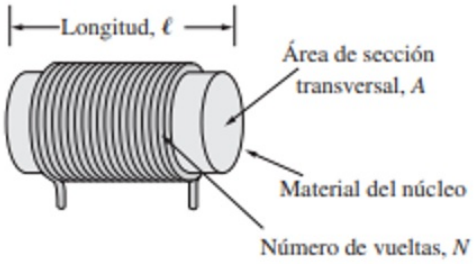


Fig. 2.63: Forma habitual de un inductor.

Un inductor consta de una bobina de alambre conductor. La constante de proporcionalidad es

lo que ahora llamamos inductancia, simbolizada como L, por lo que:

$$v = L\frac{di}{dt} \tag{2.120}$$

La inductancia es la propiedad por la cual un inductor presenta oposición al cambio de la corriente que fluye por él, medida en henrys (H). [41]

El símbolo de circuito del inductor se presenta en la Figura 2.64, y debe observarse que se emplea la convención de signos pasiva, exactamente como se hizo con la resistencia y el capacitor. La unidad con la que se mide la inductancia es el henry (H), y la ecuación de definición muestra que el henry es sólo una expresión más breve de un voltsegundo por ampere. [40]

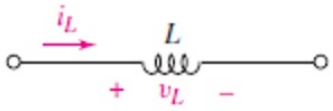


Fig. 2.64: Símbolo eléctrico y convenciones de corriente-tensión de un inductor.

2.32 Semiconductores

Si se toma un bloque de silicio y se dopa una parte de él con una impureza trivalente y la otra con una impureza pentavalente, se forma un límite llamado unión pn entre las partes tipo p y tipo n resultantes y se crea un diodo básico. Un diodo es un dispositivo que conduce corriente en sólo una dirección. La unión pn es la característica que permite funcionar a diodos, ciertos transistores y otros dispositivos (Figura 2.65).[42]

Cuando el potencial del ánodo es positivo con respecto al cátodo, se dice que el diodo tiene polarización directa o positiva y el diodo conduce. Un diodo en conducción tiene una caída de voltaje directa relativamente pequeña a través de sí mismo; la magnitud de esta caída de voltaje depende del proceso de manufactura y de la temperatura de la unión. Cuando el potencial del cátodo es positivo con respecto al ánodo, se dice que el diodo tiene una polarización inversa.

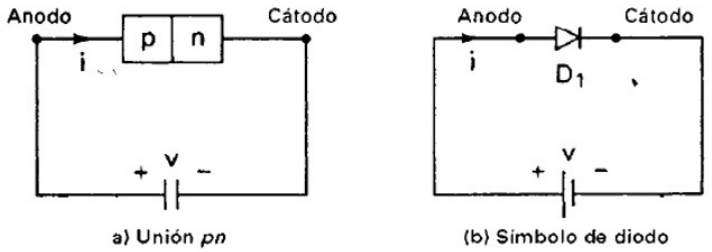


Fig. 2.65: Unión de materiales y símbolo del diodo.

Bajo condiciones de polarización inversa, fluye una pequeña corriente inversa (también conocida como corriente de fuga) en el rango de los micros o de los miliampers, cuya magnitud crece lentamente en función del voltaje inverso, hasta llegar al voltaje de avalancha o zener. En la Figura 2.66 se muestran las características de v – i de un diodo en régimen permanente. Para fines prácticos, un diodo se puede considerar como un interruptor ideal, cuyas características se muestran en la siguiente en la Figura.[43]

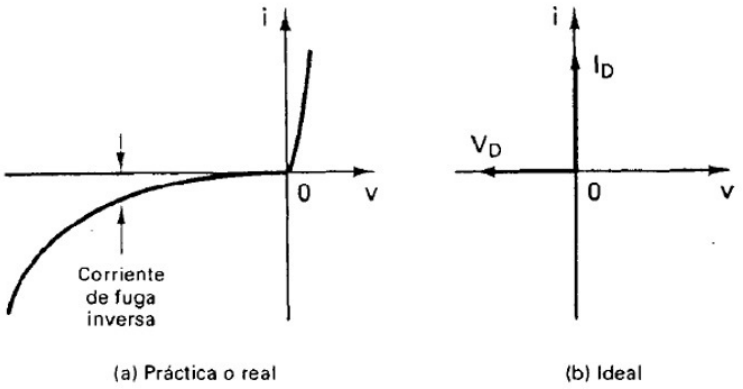


Fig. 2.66: Características v–i del diodo.

La curva característica se divide en 3 regiones:

Región de polarización directa, donde $VD > 0$. La corriente del diodo ID es muy pequeña si el voltaje del diodo VD es menor que un valor especifico VTD (típicamente 0.7 v). El diodo conduce totalmente si VD es mayor que este valor VTD, que es el umbral es un voltaje al cual el diodo conduce totalmente. [43]

Región de polarización inversa, donde $VD < 0$. Es la condición que en esencia evita la circulación de corriente a través del diodo. Región de ruptura, donde el voltaje excede el voltaje de ruptura.

2.33 Transistores

Los transistores tienen características controladas de activación y desactivación. Los transistores, que se utilizan como elemento conmutadores, se operan en la región de saturación, lo que da como resultado en una caída de voltaje baja en estado activo. Los transistores se pueden clasificar de manera general en cuatro categorías:

a) Transistores bipolares de juntura (BJT).

a) Transistores semiconductores de metal de óxido de efecto de campo (MOSFET).

b) Transistores de inducción estática (SIT).

b) Transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT).

2.33.1 Transistores bipolares de juntura (BJT)

Un transistor bipolar se forma añadiendo una segunda región n o p a un diodo de unión np. Con dos regiones n y una región p, se forma dos uniones conociéndose como un transistor NPN, como se muestra en la Figura 2.67. Las terminales se llaman colector, emisor y base.

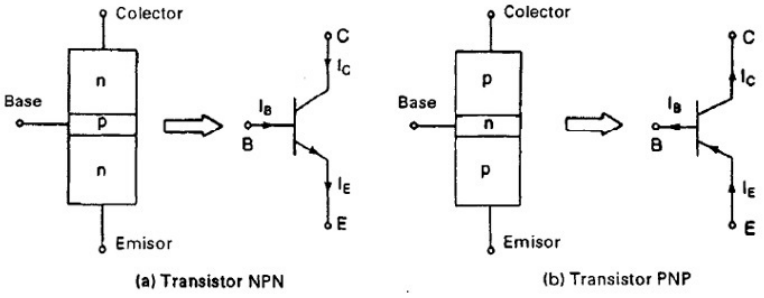


Fig. 2.67: Transistores bipolares.

En la Figura 2.68 se muestran las curvas características.

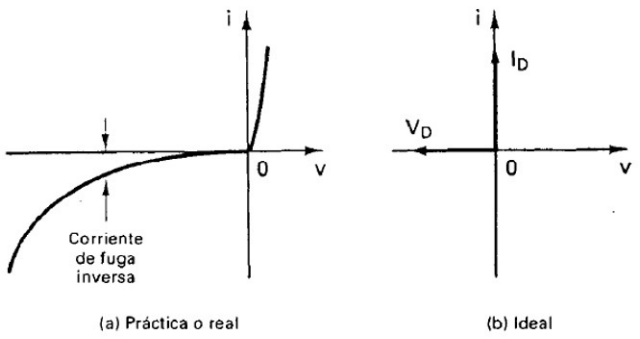


Fig. 2.68: Curvas características del transistor bipolar.

La Figura 2.69 se ilustra la operación básica de un BJT como dispositivo de conmutación. En la parte a), el transistor está en la región de corte porque la unión base-emisor no está polarizada en directa. En esta condición, existe, idealmente, una abertura entre el colector y el emisor, como lo indica el equivalente de interruptor. En la parte b), el transistor está en la región de saturación porque la unión base-emisor y la unión base-colector están polarizadas en directa y la corriente en la base llega a ser suficientemente grande para provocar que la corriente en el colector alcance su valor de saturación. En esta condición, existe, idealmente, un corto entre el colector y el emisor, como lo indica el equivalente de interruptor. En realidad, normalmente ocurre una pequeña caída de voltaje a través del transistor de unos cuantos décimos de volt, la cual es el voltaje de saturación, VCE(sat). [42]

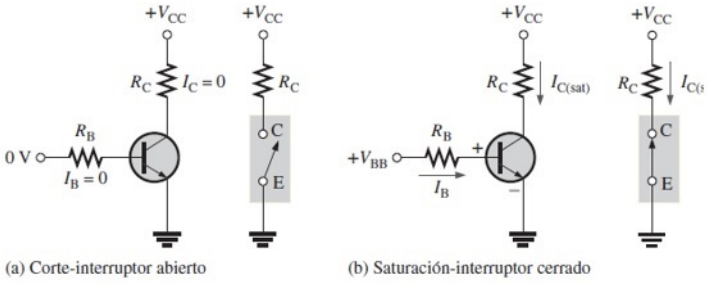


Fig. 2.69: Operación básica de un BJT.

2.33.2 Transistor MOSFET

El JFET (transistor de efecto de campo de unión) es un tipo de FET que opera con una unión pn polarizada en inversa para controlar corriente en un canal. Según su estructura, los JFET

caen dentro de cualquiera de dos categorías, de canal n o de canal p.

Un MOSFET de potencia es un dispositivo controlado por voltaje, que requiere solo de una pequeña corriente de entrada. La velocidad de conmutación es muy alta siendo el tiempo del orden de los nanosegundos. Los MOSFET de potencia están encontrando cada vez más aplicaciones en los convertidores de alta frecuencia y baja potencia. Los MOSFET no tienen problema de los fenómenos de ruptura secundaria que tienen los BJT. Sin embargo tienen problemas de descargas electrostáticas, por lo que su manejo requiere de cuidados especiales.

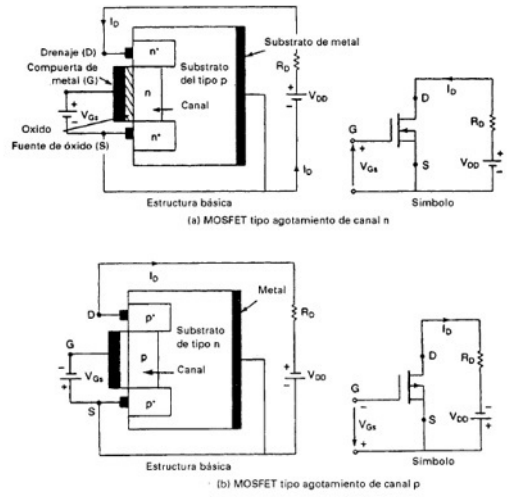


Fig. 2.70: MOSFET tipo agotamiento.

2.34 Convertidores de CC-CC

Los convertidores CC-CC (de corriente continua a corriente continua) son circuitos electrónicos de potencia que convierten una tensión continua en otro nivel de tensión continua y, normalmente, proporcionan una salida regulada.

Los circuitos convertidores se clasifican como convertidores CC-CC en modo conmutado o convertidores CC-CC conmutados, que también se denominan fuentes de alimentación conmutadas.[44]

2.35 Reguladores lineales de tensión

Un método para convertir una tensión continúa a otra de valor más bajo es utilizar el sencillo circuito de la Figura 2.71 donde donde el voltaje se calcula:

$$V_o = I_L R_L \tag{2.121}$$

Donde la corriente de carga está controlada por el transistor.

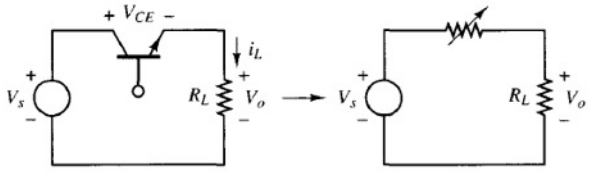


Fig. 2.71: MOSFET tipo agotamiento.

Aunque esta es una manera sencilla de reducir una tensión de alimentación continua y regular la salida, la baja eficiencia de este circuito es una desventaja importante en las aplicaciones de potencia.

2.36 Convertidor conmutado básico

En la Figura 2.72 se muestra una alternativa más eficiente al regulador lineal es el convertidor conmutado. Es un convertidor conmutado, el transistor funciona como un interruptor electrónico, al estar completamente activado o completamente desactivado.

2.36.1 Tipos de convertidores

2.36.2 El convertidor Reductor

El voltaje promedio de la salida V_o, es menor que el voltaje de entrada V_s. En la Figura 2.73 se muestra el circuito en su estado abierto y cerrado.

Donde el voltaje de salida está dado por:

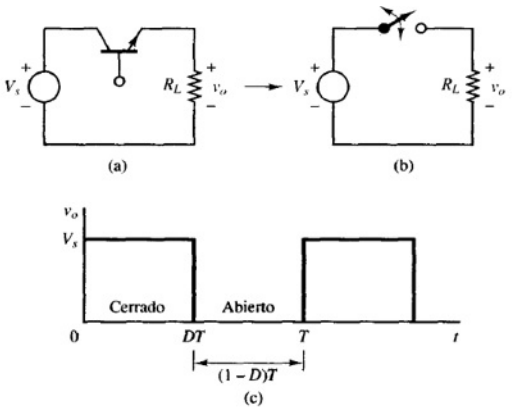


Fig. 2.72: Convertidor conmutado.

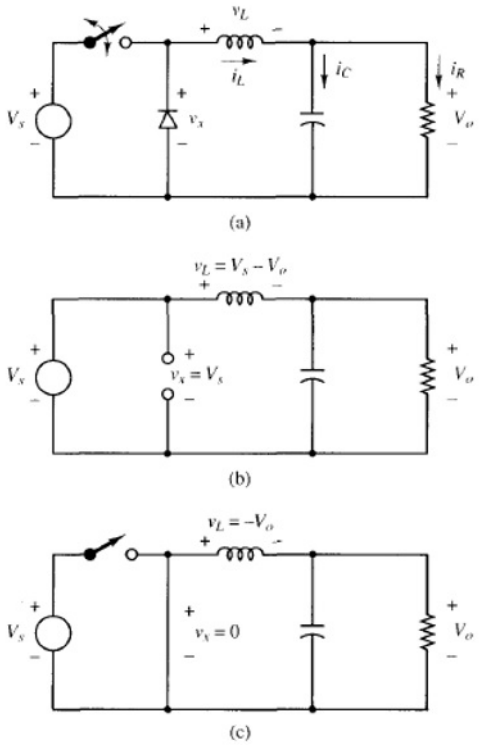


Fig. 2.73: Convertidor reductor.

$$V_o = V_s D \tag{2.122}$$

Por lo que se observa que el voltaje de salida es una fracción del voltaje de entrada, que depende del ciclo de trabajo D.

2.36.3 El convertidor Elevador

Este es convertidor conmutado (Figura 2.74) que funciona abriendo y cerrando periódicamente un interruptor electrónico. Se denomina convertidor elevador porque la tensión de salida es mayor que la de entrada.[43]

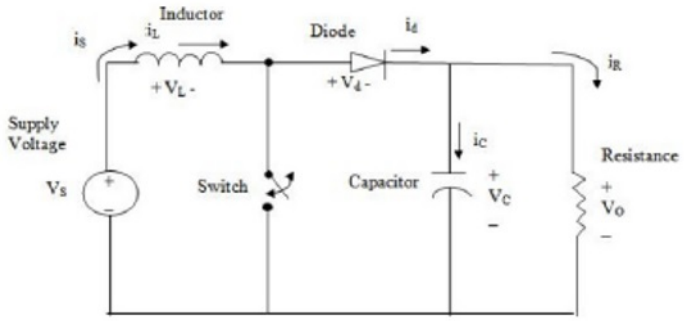


Fig. 2.74: Convertidor elevador.

Básicamente el funcionamiento del convertidor se resume así:

Cuando el interruptor (switch) está cerrado en un tiempo t_{on} la bobina (L) almacena energía de la fuente, a la vez la carga (R) es alimentada por el capacitor (C).

Cuando el interruptor (switch) está abierto en un tiempo t_{of}, el único camino para la corriente es a través del diodo, y circula por el capacitor C y por último la carga.

Los parámetros para este convertidor son los siguientes:

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \tag{2.123}$$

$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \tag{2.124}$$

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s DT}{2L} \tag{2.125}$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} \tag{2.126}$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \tag{2.127}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \tag{2.128}$$

3. DESARROLLO

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de tesis se presenta en la Figura 3.1.

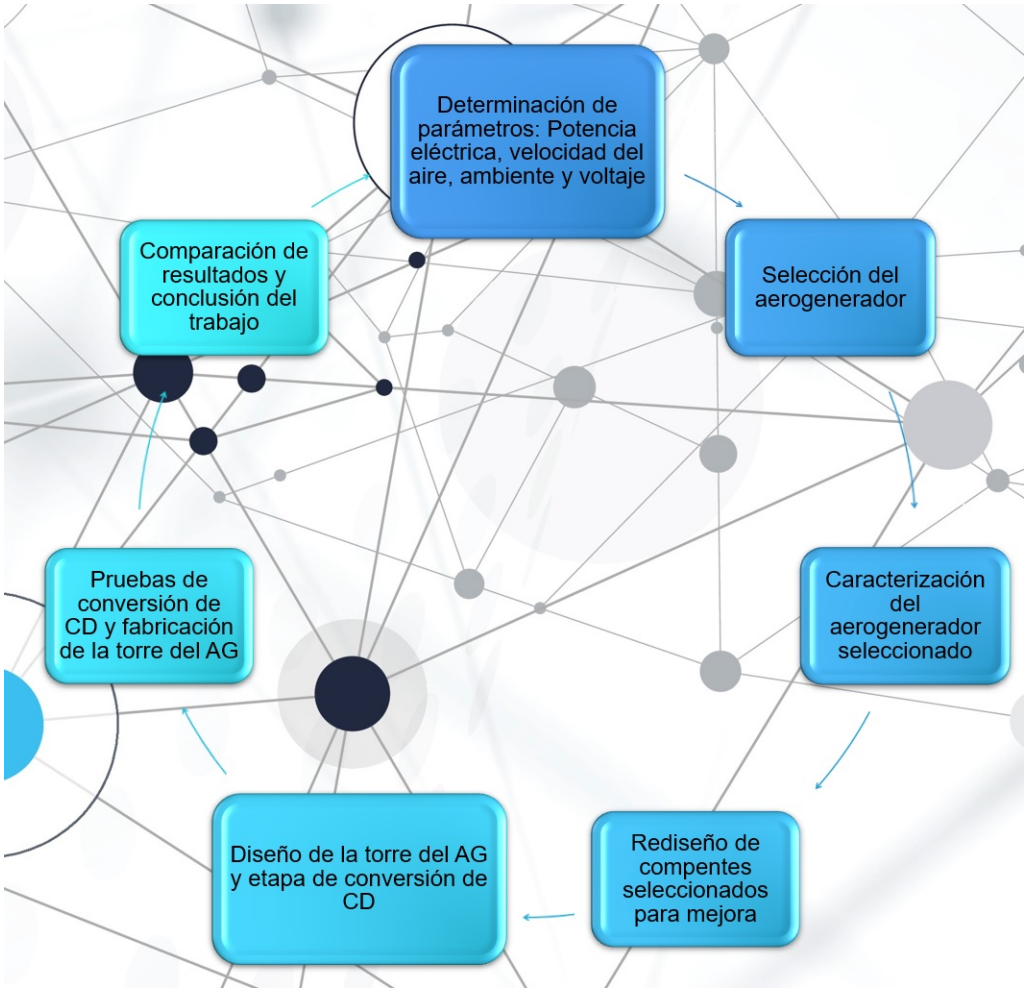


Fig. 3.1: Metodología para el desarrollo de tesis.

A continuación, se describe cada paso de la metodología a emplear para el desarrollo de esta tesis.

3.1 Determinación de parámetros: Potencia eléctrica, velocidad del aire, ambiente y voltaje.

Se requiere un AG de baja velocidad de arranque, mantenimiento fácil y de bajo costo, además de que también sea resistente a la intemperie; con la finalidad de tener una potencia eléctrica de 500 watts, con una velocidad de aire estimada de 4.5 m/s y un voltaje generado de 12 volts de corriente directa. Al ser un ambiente de costero se requiere que el AG soporte corrosión y humedad con la finalidad de aumentar su vida útil y productividad de este.

Es importante conocer el consumo estimado de la vivienda en la cual se podrá implementar el aerogenerador. En la Tabla 3.1 se muestra un consumo estimado de los aparatos eléctricos empleados en la vivienda piloto.

Tab. 3.1: Consumo estimado de la vivienda

Aparato eléctrico	Potencia eléctrica (kW)	Cantidad de aparatos	Horas de consumo	Días de consumo	Consumo mensual (kW)
Foco incandesente	0.06	5	3	30	27
Televisión	0.1	1	3	30	9
Licuadora	0.3	1	0.15	30	1.35
Ventilador	0.1	1	4	30	12
Total					**49.35**

La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire (ρ), del área de barrido del rotor (A) y de la velocidad del viento (v) (ver Figura 3.2). La energía cinética de una masa de aire (m), moviéndose a una velocidad (v), responde a la expresión de la Ecuacion 2.1.

Si el volumen de aire que se mueve es (V) y tiene una densidad (ρ) su masa será:

$$m = V * \rho \tag{3.1}$$

La cantidad de aire que llegará al rotor de un aerogenerador en un tiempo (t) dependerá de: el área de barrido del rotor (A) y de la velocidad del viento. El volumen del aire que llega al rotor será:

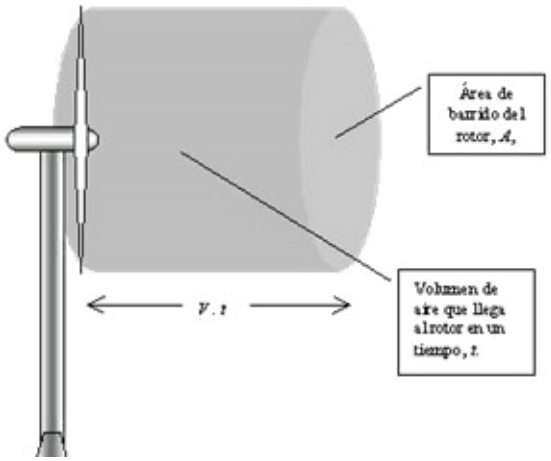


Fig. 3.2: Area de barrido del rotor y volumen de aíre

$$V = A * v * t \tag{3.2}$$

Sustituyendo las Ecuaciones 3.1 y 3.2, en la Ecuación 2.2, la energía cinética que aporta el aire al rotor en un tiempo (t) será:

$$E_c = \frac{1}{2}\rho t v A v^2 \tag{3.3}$$

Con lo que su energía cinética da origen a la Ecuacíon 2.2, la cual es: $P_d{=}\frac{1}{2}\rho A v^3$

Considerando que $\rho = 1{,}185 Kg/m^3$ y la potencia que se desea es de 500 Watts, se calcula la longitud de largo de la pala del aerogenerador:

$$\tfrac{1}{2}\rho A v^3 = (0{,}5)(1{,}185 Kg/m^3)(A)(4{,}5 m/s)^3 = 500 W/m^2$$

$$\Rightarrow A = 9{,}1449 m^2$$

Se tiene que: $A = \dfrac{\Pi * d^2}{4}$

$$\Rightarrow d = 3{,}4336 m \therefore r = 1{,}7168\text{m}$$

La Ecuación aplicada con anterioridad se conoce como la Ecuación de potencia eólica, la potencia util del viento esta dada por la Ecuácion 2.1, con lo que se tiene:

$$P_{util} = \frac{16}{27}\frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{3.4}$$

Sustituyendo valores en la Ecuación 3.4

$$\tfrac{1}{2}\rho A v^3 = (16/27)(0{,}5)(1{,}185 Kg/m^3)(A)(4{,}5 m/s)^3 = 500 W/m^2$$

$$\Rightarrow A = 15{,}627 m^2$$

$$\Rightarrow d = 4{,}46 m \therefore r = 2{,}2\text{m}$$

Debido a que es un radio muy grande, ademas de que implica un costo de fabricación mas elevado para el aerogenerador que se desarrolara, se utilizaran palas de 60 cm. En la Figura 3.3 se muestra la pala a emplear.

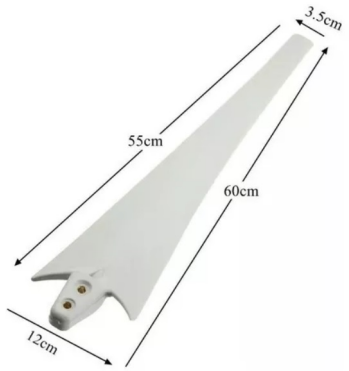


Fig. 3.3: Palas a implementar

3.2 Selección del AG

Para llevar a cabo la selección del AG se revisaron los aerogeneradores eólicos disponibles en el mercado local, se revisaron en base a la potencia eléctrica deseada (500 Watts) y el costo de este. Además de otros parámetros como lo son la velocidad de arranque del generador y el voltaje que esta entrega. El aerogenerador seleccionado (Figura3.4) para este caso cumple con las características:

a) Color: Blanco

a) Número de palas: 5

b) Potencia nominal: 500 W

b) Potencia máxima: 510 W

d) Tensión nominal: 12 V

e) Velocidad de arranque del viento: 2.0 m / s.

f) Velocidad nominal del viento: 13 m / s

g) Velocidad segura del viento: 50 m / s.

h) Longitud de la hoja: 55 cm

i) Peso neto del motor principal: 7.5 Kg.

h) Certificación IP65



Fig. 3.4: Generador eléctrico a implementar.

Para el controlador del carga (véase Figura 3.5) se tienen las siguientes carácteristicas:

e) Potencia nominal: 300/600 W.

f) Volataje: 12/24 V.

g) Corriente: 16/10 A.

g) Centificación: IP67.

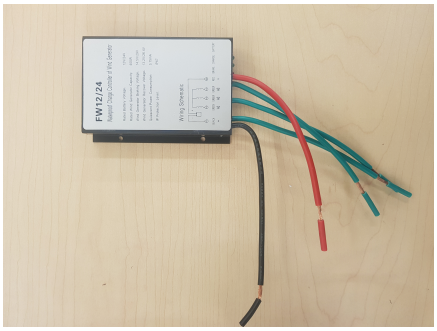


Fig. 3.5: Controlador de carga a implementar

Este controlador de carga cuenta con tres luces indicadoras, las cuales ayudan a identificar el comportamiento del generador.

a) Cuando el aerogenerador se frena, la luz roja se encenderá.

b) Si la luz verde parpadea significa que el generador de viento funciona y está cargando la batería.

c) La velocidad intermitente muestra la velocidad de giro del generador. Esta luz verde encendida también significa que la batería está conectada correctamente.

Para el AG seleccionado es necesario hacer mejoras en el, con lo que respecta a las palas y al hub, estos están fabricados de fibra de nylon, la cual al estar en ambientes agresivos se ven afectados por lo cual no es factible emplear el AG sin antes proteger con los componentes.

3.3 Caracterización del AG seleccionado

Se caracterizo el generador eléctrico midiendo voltaje generado a cierto número de revoluciones por minuto (rpm), con la finalidad de conocer el comportamiento del aerogenerador en vacío, es decir, sin carga conectada. Para obtener el voltaje se conecto el AG al controlador de carga descrito con anterioridad, los cables negro y rojo corresponden al negativo y al positivo; estos cables son los que se conectan a una batería de 12 volts de corriente directa (CD). Los tres cables verdes sobrantes se conectan a las tres fases del generador eléctrico, el controlador de carga realiza la conversión de corriente alterna (CA) a CD como se aprecia en la Figura 3.6.

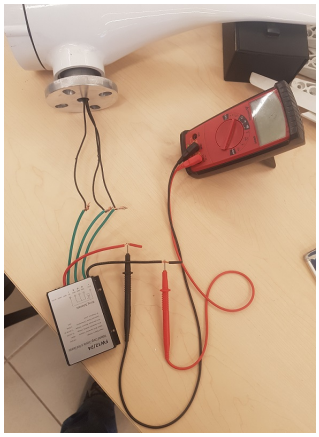


Fig. 3.6: Medición de voltaje.

En los cables negro y rojo se conectó un multímetro (Figura 3.6) y con la ayuda de un tacómetro se obtuvo los la lectura de las rpm a las cual gira el eje del generador eléctrico. En la Tabla 3.2 se muestran los datos obtenidos.

Tab. 3.2: Voltaje y rpm medidos

Voltaje	rpm
0	0
6.0	231
6.5	237
7.0	255
9.3	330
10.2	360
10.6	375
12.3	415

Una característica de este aerogenerador se presenta, cuando se excede el número máximo de rpm este se protege desconectado al eje donde se sujetan las palas del eje del generador eléctrico. El comportamiento del AG respecto al voltaje generado y las rpm se presenta en la Figura 3.7.

3.4 Selección de componentes para mejora del AG

Los componentes seleccionados para mejora son las palas y el hub del aerogenerador, como se mencionó en los objetivos de este trabajo de tesis se aplicará fibra de vidrio como recubrimiento especial en los componentes seleccionados con la finalidad de mejorar su resistencia a la corrosión

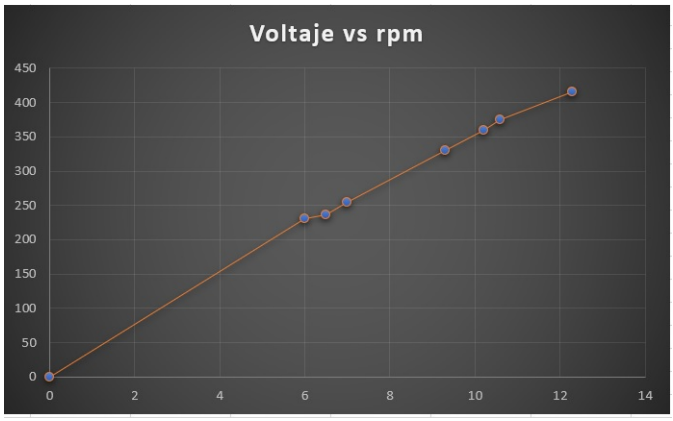


Fig. 3.7: Grafica de voltaje vs rpm.

y salinidad. A dichas piezas se le aplicara un análisis de elemento finito para determinas puntos críticos de esfuerzos y deformaciones.

Para iniciar el análisis es necesario modelar los componentes en software CAD, para dicha modelación se modelaron en Solidworks 2018 los componentes previamente seleccionados, como se muestra en las Figuras 3.8 y 3.9.

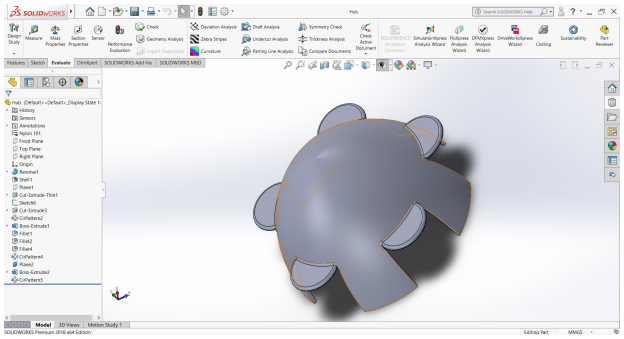


Fig. 3.8: Modelado del hub en Solidworks 2018.

Para llevar a cabo la aplicación de la fibra de vidrio como recubrimiento especial para las palas del AG, fue necesario seleccionar la resina con la que se adhiere, la característica principal de esta resina debe de ser que tenga una temperatura de aplicación adecuada para no dañar la palas, para ello se utilizó la resina que se muestra en la Figura 3.10.

Antes de aplicar la resina a las palas, se realizó una prueba en una pieza de PVC (Policloruro

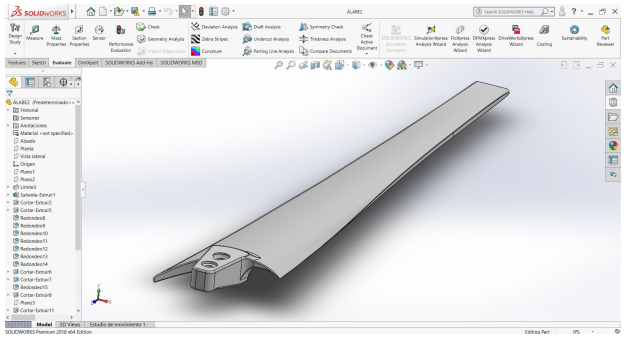


Fig. 3.9: Modelado de la pala en Solidworks 2018.



Fig. 3.10: Resina Mérida.

de Vinilo) con la finalidad de comprobar si la resina no deforma o daña a los elementos en lo que se aplica. En la Figura 3.11 se muestra la aplicación de fibra de vidrio a una pieza de hecha de PVC.



Fig. 3.11: Aplicación de fibra de vidrio a un pieza de PVC.

Para preparar la resina que se aplicó a esta pieza de PVC (Figura 3.11) se emplearon 100 ml de resina y tres gotas de secante, se dejó secar por más de cinco horas a temperatura ambiente;

después de secarse por completo, se revisó la pieza y no se obtuvo ninguna deformación, pero el tiempo de secado fue muy extenso, la fibra de vidrio aplicada en este caso se adhirió bien al PVC. Además del PVC se hizo la prueba en un objeto hecho con plástico, teniendo como resultado ninguna deformación (véase figura 3.12).



Fig. 3.12: Aplicación de fibra de vidrio al plastico.

La cantidad de secante que se aplica a la resina interviene en el tiempo en el que esta se seca. Para ello se hicieron distintas pruebas con cantidades diferentes de secante y se midieron las temperaturas de la resina con la ayuda de un termómetro infrarrojo para las aplicaciones se tuvo una temperatura promedio de 25^{o}C. Además de ver el comportamiento de la resina a distintas cantidades de secante también se observó el acabado de la fibra de vidrio. En la Figura 3.13 se puede ver el acabado de la fibra con distintas cantidades de secante y en la Tabla 3.3 una breve descripción de la calidad del acabado.



Fig. 3.13: Acabado de la fibra con distintas cantidades de secante.

Tab. 3.3: Cantidad de resina y secante aplicado

Cantidad de resina	No. De gotas	Comportamiento
100 ml	3	Tiene un buen acabado.
100 ml	8	Tiene un buen acabado
100 ml	10	El acabado es bueno y el tiempo de secado es de 6 horas aproximadamente.
100 ml	20	El acabado es regular, no se puede dar forma a la fibra de vidrio.
100 ml	30	La resina se pone muy espesa al tener mucho secante, con lo cual no se puede minupular con facilidad y esto hace que sea dificil de trabajar, el acabado es malo.

El proceso de forrado de las palas se hizo en dos partes (uno para cada cara de la pala), para ello se dibujó el contorno de la pala sobre la fibra de vidrio como se ve en la Figura 3.14, después se recortó este (véase Figura 3.15) para ser aplicado a la pala como se muestra en la Figura 3.16



Fig. 3.14: Pala puesta sobre fibra de vidrio para dibujar su contorno.



Fig. 3.15: Recorte del forro de la pala.

Después de aplicar la fibra de vidrio en la pala queda como se muestra en la Figura 3.17, para forrar las palas se utilizó una porción de 100 ml de resina por 10 gotas de secante y se preparó



Fig. 3.16: Aplicación del forro de fibra de vidrio a la pala.

según se fuera utilizando para evitar desperdiciar la resina y el secante.



Fig. 3.17: Apliación de la fibra de vidrio.

La temperatura que alcanzo la pala fue de 25.9 ^oC al aplicarle la resina, la lectura de dicha temperatura se muestra en la Figura 3.18.



Fig. 3.18: Temperatura de la resina en la apliación de la fibra de vidrio.

El proceso de secado de la pala se hizo en frio, para obtener un mejor acabado, para esto se empleó una cámara de refrigeración, en la cual se introdujeron las palas para ser secadas en frio a una temperatura de -25 ^oC para después dejarse secar a temperatura ambiente. En la Figura

3.19 se puede ver la pala dentro de la cámara de refrigeración y las cinco palas forradas de un solo lado se muestran en la Figura 3.20.



Fig. 3.19: Temperatura de la resina en la apliación de la fibra de vidrio.



Fig. 3.20: Palas terminadas de un solo lado.

El mismo procedimiento para forrar las palas se aplicó para aplicar la fibra de vidrio al otro lado de la pala, quedando las palas como se muestran en la Figura 3.21.



Fig. 3.21: Pala terminada de ambos lados.

Para dar acabado al contorno de la pala se le aplico resina, y después de que esta se secara por completo, se desbasto el exceso de resina con ayuda de un Dremel (véase Figura 3.22) para que las palas conservaran su perfil quedando como se muestran la Figura 3.23 y el hub terminado se presenta en la Figura 3.24.



Fig. 3.22: Pala terminada.



Fig. 3.23: Pala terminada.



Fig. 3.24: Hub terminado.

Otro punto a considerar fue como retirar el exceso de resina de las palas y hub, ya que no debe quedar excesos, para no deformar el perfil de las palas. Respecto a la construcción de las probetas se hicieron en capas de fibra y PVC, añadiendo resina para lograr la unión de un

material compuesto. Se aplicaron dos capas de fibra de vidrio, después la de PVC y finalmente dos de fibra de vidrio, la resina de debe de retirar para no dejar excesos y ayudar al que el material tipo sándwich se forme en capas.

3.5 Construción de probetas para estudio de propiedades mecánicas

Se construyeron cuatro probetas, la descripción de cada una de ellas se muestra en la Tabla 3.4.

Tab. 3.4: Probetas construidas

Probeta	Compuesto	Dimensiones (cm)
1	PVC	10 por 3
2	Fibra de vidrio y PVC	11 por 2.2
3	Fibra de vidrio, PVC y pintura anticorrosiva	12 por 2.6
4	Fibra de vidrio	12 por 3

Las probetas se construyeron a partir de componentes hechos con PVC y fibra de vidrio. En la Figura 3.25 se puede ver la proyección de las tres probetas de PVC sobre componentes de dicho material.



Fig. 3.25: Construcción de probetas

Después de recortar las probetas se pulieron en la maquina pulidora utilizando una lija del numero 120, el procedimiento se muestra en la Figura 3.26.

Una vez terminada las probetas dos de ellas se forraron con fibra de vidrio, de tal manera que formaran cuatro capas de fibra de vidrio quedando en medio de estas la probeta de PVC; esto con la finalidad de formar un material compuesto, esta configuración se muestra en la Figura 3.27.



Fig. 3.26: Pulido de las probetas de PVC



Fig. 3.27: Pulido de las probetas de PVC

Se formaron dos probetas de la misma manera, a una de ellas se le aplico pintura anticorrosiva, la construcción de la probeta se muestra en la Figura 3.28.

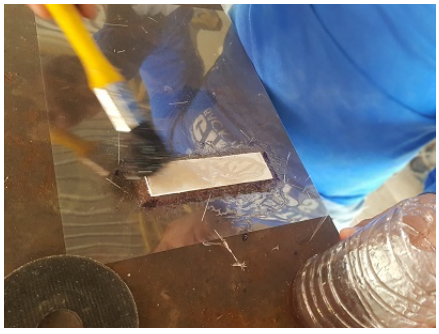


Fig. 3.28: Apliación de la resina a las probetas

La probeta formada a partir de las capas anteriormente mencionadas se muestra en la Figura 3.29.



Fig. 3.29: Probeta de PVC y fibra de vidrio

Las probetas hechas se muestran en la Figura 3.30.



Fig. 3.30: Probeta de PVC y fibra de vidrio

3.6 Instrumentación de probetas y prueba de instalación de extensómetros

El proceso de pegado de galga extensométrica que se utilizó fue el sugerido por VISHAY, y es relativo al pegamento M-BOND 200. Este es un adhesivo del tipo cianocrilato, que puede ser usado para pruebas hasta el orden de 30,000 microdeformaciones, en estudios de fatiga, para ensayos extremos entre $+95^oC$ y -185^oC en un ciclo único. El rango normal de temperatura de trabajo es de -30^oC a $+65^oC$, es compatible con todas las galgas extensométricas y la mayoría de materiales de estructuras mecánicas.[45]

A continuación se describe el proceso de pegado:

Paso 1: Con la ayuda de una gasa retirar el exceso de grasa de la zona donde se aplicará la galga con desengrasante, disolvente CSM-1 o alcohol Isopropílico GC-6 como se muestra en la

Figura 3.31.

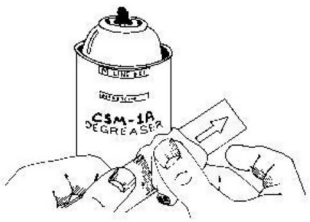


Fig. 3.31: Proceso de limpieza[33]

Paso 2: En este paso se debe de preparar el área donde se colocará la galga, limando, marcando y neutralizando dicha área; para ello se siguió el procedimiento que a continuación se enlista:

1.- Limado de la zona aplicación de la galga: En este punto se utilizó una lija para agua del número 220, después una del numero 320 y finalmente una del numero 400; esta ultima con la finalidad de dar un acabado superficial a la zona. Además, se utilizó se usó acondicionado de metal MCA.

2.-Secado de la zona de aplicación: Con ayuda de una gasa limpia de debe de limpiar la zona; la gasa solo debe ser movida en una sola dirección, este procedimiento debe ser repetido hasta que la gasa no sea ensuciada. Este procedimiento se puede ver en la Figura 3.32.

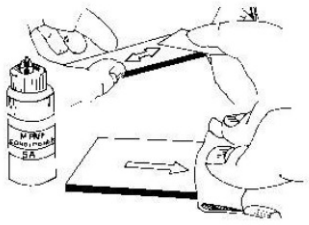


Fig. 3.32: Limpieza con gasas[33]

3.- Se señalan los ejes de posicionamiento transversal y longitudinal de los extensómetros.

4.- El exceso de carbón o tinta con el que se señalan lo ejes, debe de ser retirado con bastoncillos de punta de algodón y neutralizador (5A), este proceso solo se hace en una sola dirección y

termina hasta que el bastoncillo este limpio (ver Figura 3.33).

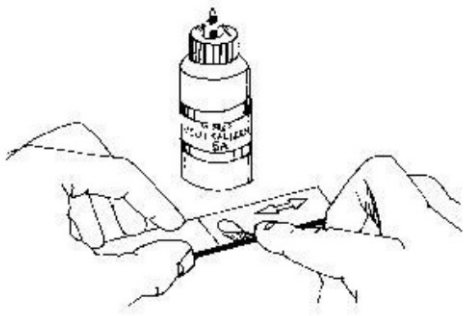


Fig. 3.33: Limpieza con bastoncillo y neutralizador[33]

Paso 3: Después humedecer la superficie con el Neutralizador 5A como se muestra en la Figura 3.34, inmediatamente se debe de secar la superficie con una gasa y esto se hace una sola dirección con la finalidad de no dañar la superficie.

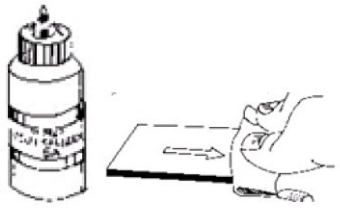


Fig. 3.34: Limpieza con bastoncillo y neutralizador[33]

Paso 4: Sacar con ayuda de una pinza el extensómetro y las terminales de su estuche, colocarlas a una distancia aproximada de 1.5 mm, sobre un cristal previamente limpiado con disolvente CSM-1 o alcohol isopropílico GC-6 y gasas. Luego se coloca sobre el conjunto galga-terminal, una cinta autoadhesiva Micro Measurements PCT-2a de 10 a 15 cm en forma longitudinal, y se libera el conjunto levantando la cinta de un extremo un ángulo pequeño menor de 45 grados como se muestra en la Figura 3.35.[33]

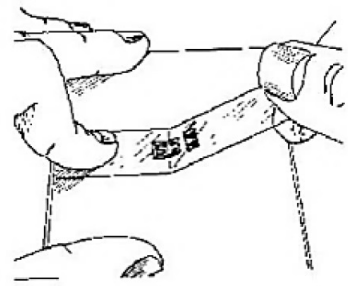


Fig. 3.35: Levantado de cinta a un ángulo menor de 45 grados[33]

Paso 5: Se colocan la galga y las terminales sobre los ejes trazados Figura 3.36. Los triángulos de alineamiento de la rejilla deben coincidir con las marcas de posicionamiento, si es necesario, repetir la operación levantando la cinta hasta que quede posicionada correctamente. Una vez posicionada, presionar la cinta sobre la probeta. La cinta PTC-2A impide la contaminación de la superficie limpia.[33]

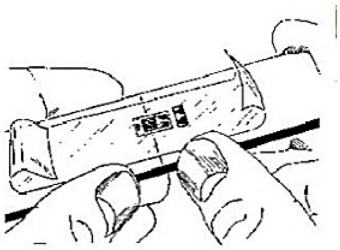


Fig. 3.36: Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[33]

Paso 6: Se retira la cinta del otro extremo en un ángulo de 45 grados (ver Figura 3.37a)) hasta que la galga y los espacios de las terminales tengan un espacio de alrededor de 10 mm y se dobla la cinta hasta dejar la galga y terminales en posición horizontal respecto a la superficie de la probeta 3.37 b).



Fig. 3.37: Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[33]

Paso 7: Para acelerar el proceso de endurecimiento del pegamento, si es necesario, se aplica una capa fina y uniforme de catalizador sobre el extensómetro y terminales como se observa en la Figura 3.38. El pincel debe escurrirse aproximadamente 10 veces en el borde del frasco del catalizador antes de aplicarse. Dejar un minuto al aire libre en ambiente normal 24^{o}C y entre 30 y 65 % de humedad relativa. [33]

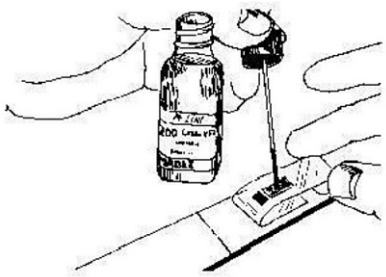


Fig. 3.38: Proceso de colocación de cinta-galga-terminales en la probeta[4]

Nota: Las tres operaciones siguientes se deben realizar en el orden indicado y con una duración de 3 a 5 segundos. Se sugiere leer las operaciones 8, 9 y 10 antes de proceder al pegado.

Paso 8: Levantar el extremo libre de la cinta adhesiva y, manteniéndola en dicha posición, aplicar una o dos gotas de adhesivo M-Bond 200 en el borde del pliegue formado por la cinta con la superficie de la probeta (ver Figura 3.39) y a unos 10 – 15 mm de la zona de asentamiento final de la galga. Esto garantiza que la polimerización local no ocasione un pegado de capa desigual.

Paso 9: Rotar la cinta adhesiva un ángulo de 30^o de tal forma que la galga se encuentre casi vertical a su posición final, luego manteniendo la cinta rígida. Para obtener una capa uniforme y óptimas prestaciones de pegado, con los dedos y una gasa, se presiona lenta pero firmemente en un solo movimiento el conjunto galgo/terminal (Figura 3.40), para ponerlo en contacto con la superficie de la probeta.

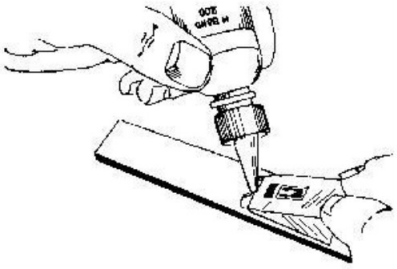


Fig. 3.39: Forma correcta de la aplicación de adhesivo M-Bond 200[33]

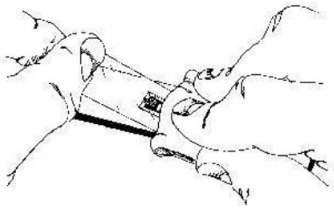


Fig. 3.40: Presión para obtener capa uniforme de adhesivo

Paso 10: Inmediatamente después, se aplica una presión con el dedo pulgar encima de la galga y las terminales (Figura 3.41). Se mantiene esta presión durante un minuto. En condiciones de baja humedad relativa (<30 %) o con temperatura ambiente inferior a 20^{o}C, esta presión debe prolongarse por varios minutos. En el caso de usar galgas de grandes dimensiones o de encontrarse con superficies curvas, ejemplo ranuras, puede ser ventajoso usar pastillas de presión durante la operación. El tiempo de aplicación de la presión debe ser mayor dada la falta de <<la temperatura del dedo>>, que facilita la velocidad de polimerización. Esperar dos minutos o más antes de levantar la cinta adhesiva.

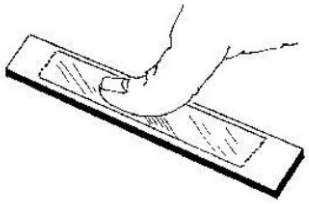


Fig. 3.41: Presión con el dedo pulgar sobre la galga y las terminales[33]

Paso 12: Retirar la cinta de la zona de aplicación envolviéndola sobre si misma y despegándola firmemente, esto con la finalidad de evitar que la rejilla de la galga se despegue, este procedimiento se muestra en la Figura 3.42.

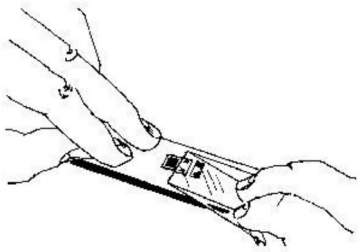


Fig. 3.42: Presión con el dedo pulgar sobre la galga y las terminales[33]

3.6.1 Proceso para soldar los conductores a la galga extensométrica

Una vez concluido el proceso de pegado descrito con anterioridad, se deben soldar las terminales de las galgas o en las terminales especiales CPF-75C M-Line. Este proceso de realizo de acuerdo a las recomendaciones de Vishay, el proceso de describe a continuación:
Paso 1: Lijado de terminales para eliminar barniz: Eliminar cuidadosamente con lija 320 o 400 el barniz que cubre las terminales de la galga y las terminales CPF-75C M-Line.[46]

Paso 2: Preparación para conectar terminales de la galga a terminales CPF-75C: Cortar dos tramos de aproximadamente 20 mm, de cable magneto de 0.17 mm de diámetro y eliminar el barniz de cada extremo con lija o con navaja afilada con mucho cuidado.[46]

Paso 3: Soldar los extremos de los tramos alambres magneto a las terminales: Con cautín de punta plana (Figura 3.43), soldar los extremos con un ángulo aproximado de 30^oC, como se muestra en la Figura 3.21. La temperatura generada debe fundir la soldadura de estaño de 0.5 mm 361A-20R-25, y el cautín no debe hacer contacto con la terminal de la galga por más de un segundo. Este paso es ejecutado de la siguiente forma:[46]

1) Recubrir las terminales con soldadura para tener mejor transferencia de calor y una

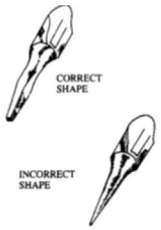


Fig. 3.43: Tipo de punta de cautín[33]

soldadura rápida y nítida. La soldadura debe formar un pequeño montículo como el observado en la Figura 3.44. Deben evitarse soldaduras opacas y picos.[46]

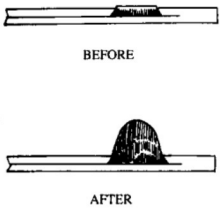


Fig. 3.44: Montículo[33]

2) Si se usan galgas extensométricas no encapsuladas, antes de soldar debe cubrirse el área de la galga con cinta adhesiva, dejando expuestas a soldar, la mitad de las terminales de la galga como se muestra en la Figura 3.45.[46]

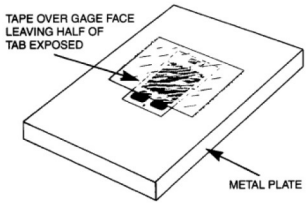


Fig. 3.45: Montículo[4]

3) Una vez que los promontorios de soldadura estén hechos, proceder a soldar los extremos de los tramos de los alambres magneto, colocándolos en los promontorios y aplicando calor y presión al mismo tiempo hasta lograr que cada extremo quede embebido en la soldadura.[46]

Paso 4: Soldadura de los conductores a las terminales: Los cables usados son el tipo 326-DFV

de Vishay MM, formado por tres conductores (rojo, blanco, negro). Para efectuar la soldadura de estos se efectuaron los siguientes pasos:[46]

1) Eliminar el forro de plástico en el extremo de cada cable un tramo aproximado de 5 mm, previamente se despegan los 3 cables una distancia adecuada.[46]

2) El extremo de cada cable se coloca en la parte superior del promontorio de soldadura y se le aplica calor y presión con el cautín hasta lograr que el conductor quede totalmente sumergido como se muestra en la Figura 3.46. El cautín se coloca en un ángulo de 30^o, la punta del cable y la soldadura debe tener un aspecto suave y brillante.[46]

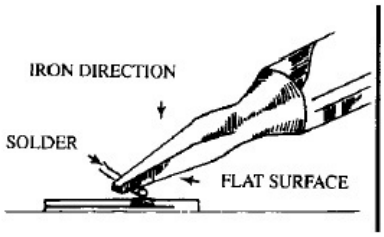


Fig. 3.46: Colocación del cautín a 30^o para soldar conductores en galgas[33]

3.6.2 Pruebas de resistencia a galgas extensométricas instaladas en probetas

Para tener la seguridad de que la instrumentación de las probetas está bien hecha, se hacen pruebas con el Gage Instalation Tester 1300 de VISHAY, Micro-Measurement.[33]

3.6.3 Recomendaciones para las pruebas

Los extensómetros más comunes tienen valores nominales de 120Ω, 350Ω y 1000Ω. Es de suma importancia que el extensómetro sea el recomendado y esté firmemente unido a la probeta para que el esfuerzo sea transferido en forma adecuada desde la pieza a través del adhesivo y el material de respaldo hasta la misma grilla metálica.[33]

En estos trabajos experimentales se instalaron en las probetas extensómetros de propósito general marca VISHAY, EA-06-120LZ-120/E, con resistencia de 120 Ω.

Para hacer las pruebas de resistencia se utilizó el Tester 1300 mostrado en la Figura 3.47. Es un instrumento compacto de baterías, usado para verificar la calidad de la instalación eléctrica del extensómetro, antes de ponerlas en servicio.



Fig. 3.47: Gage Instalation Tester Model 1300 de VISHAY, Micro-Measurement

Con este medidor se pueden ejecutar las siguientes acciones:[33]

1) Lectura con el botón oprimido.

2) Lecturas de resistencia de aislamiento (fugas) a 20,000 $M\Omega$ con $15Vdc$.

3) Medición de la desviación de precisión estándar de la resistencia de la galga instalada en la escala de 5 %.

4) Medición de la desviación de precisión estándar de la resistencia de la galga instalada en la escala de 1 %.

5) Escala en ohm para detectar instalaciones dudosas.

6) Verificar el circuito completo de la galga.

3.6.4 Procedimiento para la prueba de extensómetros

Para la prueba se usa el siguiente procedimiento:[4]

1) Se conectan los cables al Gage Instalation Tester Model 1300, cable rojo a terminal roja, negro con negro, el cable blanco se conecta de acuerdo con la resistencia de la galga. Para otros valores usar DEXT y hacer la conexión apropiada entre los postes EXT y REF.

2) Presionar BATT: para saber si es necesario remplazar la batería.

3) Presionar Ω: mostrará la medida nominal de resistencia de galga (120, 350).

4) Presionar modo de desviación ±5 % (respecto a resistencia de galga), su rango de seguridad es 0.2 % ΔR (2 graduaciones de medición).

5) Presionar modo de desviación ±1 % (respecto a resistencia de galga), rango de seguridad 0.04 % (2 graduaciones de medición).
   Se tiene una excitación 1.0 Vdc por galga.

6) Presionar MEG Ω: el medidor mostrará la resistencia de aislamiento entre la galga y el especímen.

Algunas fuentes de variaciones de la resistencia de aislamiento y cambio de la resistencia de galga son:

1) La resistencia de aislamiento deberá exceder de 20,000 $M\Omega$, para la lámina de la galga extensométrica cuando se instala bajo condiciones de laboratorio. Un valor de 10,000 $M\Omega$, podría ser considerado mínimo. Una lectura por debajo de este valor indica materia extraña atrapada, humedad, flujo residual o parte de atrás de la galga dañada por la soldadura, así como evaporación incompleta del solvente en la cubierta.

2) Deterioro de la resistencia de aislamiento con el tiempo puede ser indicativo de una inapropiada aplicación de capa protectora M-COAT A.

3) En temperaturas de prueba más altas, particularmente por encima de +300^{o}F (+150^{o}C) es normal esperar valores más bajos, 10 $M\Omega$ es el valor mínimo aceptable.

4) Cambios en resistencia de galga durante la instalación normalmente no debería exceder de 0.5 % cuando se usan adhesivos que curan a temperatura ambiente. Cambios en la resistencia por encima de 0.5 %, generalmente indican un daño a la galga, debido a manejo inadecuado o defectos de estampado. Sin embargo las galgas extensométricas instaladas con adhesivos de alta temperatura de curado, pueden presentar cambios más grandes en

la resistencia debido a que el adhesivo aumenta su rigidez. Esos cambios pueden variar dependiendo de la temperatura específica de curado y los materiales en cuestión. los cambios nunca deberían exceder al 2 % y deberían ser uniformes entre el rango de 0 y 0.5 %.

5) Pruebas de instalación de las galgas instaladas en las probetas

Una vez instrumentadas las probetas, se llevaron a cabo las mediciones de resistencia en base al proceso recomendado en el manual Gage Instalation Tester Model 1300 de VISHAY.[47]

3.6.5 Recubrimientos de protección de la galga extensométrica

La instalación completa debe protegerse mediante recubrimientos especializados. El tipo y técnica de recubrimiento depende de la aplicación y el ambiente de uso del sensor. En general se requiere de al menos un barniz protector y podría llegar a requerirse una capa de silicón o cera para protección mecánica y contra humedad respectivamente. Para aplicar el recubrimiento de protección es necesario hacer lo siguiente:

1) Limpieza e inspección de las juntas soldadas. Después de concluir la operación de soldado, es importantísimo que todos los residuos sean completamente removidos con RSK Rosin Solvent. Limpie a conciencia el área entera de la instalación con una aplicación generosa de Rosin Solvent y una brocha blanda hasta eliminar flujos residuales y manchas, y secar el área con gasa.

2) Aplicación de la cubierta protectora. Una vez que está limpia y seca el área de la galga, aplicar dos capas de recubrimiento a base de Polyuretane Coating M-COAT A (ver Figura 3.48), con diferencia de una hora después la última capa. El espesor de cada capa mide entre 0.1 y 0.25 mm. El Poliuretane Coating M-COAT A, es un solvente delgado de propósito general para uso de laboratorio, que seca al aire, tiene buena flexibilidad y puede ser removido si es necesario con M-LINE Rosin Solvent o tolueno.



Fig. 3.48: Recubrimiento Poliuretane Coating M-COAT A

3.7 Diseño de la base para montaje del AG

Por lo general, el proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad. En este caso se requiere diseñar y construir una base para el AG la cual debe de soportar la fuerza ejercida por el aire y el peso del AG.

Algunas veces la resistencia que requiere un elemento de un sistema significa un factor importante para determinar su geometría y dimensiones. En esa situación se dice que la resistencia es una consideración de diseño importante. Cuando se emplea la expresión consideración de diseño se involucra de manera directa alguna característica que influye en el diseño del elemento, o tal vez en todo el sistema.[11]

Algunas de las características que debe de cumplir el diseño de esta torre para el montaje del AG:

1) Funcionalidad

2) Resistencia/esfuerzo

3) Distorsión/deflexión/rigidez

4) Desgaste

5) Corrosión

6) Seguridad

7) Confiabilidad

8) Manufacturabilidad

9) Costo

10) Mantenimiento

Algunas de estas propiedades se relacionan de manera directa con las dimensiones, el material, el procesamiento y la unión de los elementos del sistema. Algunas características pueden estar interrelacionadas, lo que afecta la configuración del sistema total.[11]

El primer paso para inciar con el proceso de diseño es determinar las fuerzas que se ejercen sobre la base, con la finalidad de utilizar un perfil estructural que soporte dicha fuerza.

Para iniciar el calculo de las fuerzas que intervienen en el AG es necesario contar con algunos datos; los cuales se citan a continuación:

$$v_{viento} = 50m/s;\ rpm = 415 = 43{,}6rad/s;\ \rho_{aire} = 1{,}185Kg/m^3;\ R_{rotor} = 8{,}5 \times 10^{-3}m$$

La velocidad del viento se considera como $50m/s$ debido a que es la velocidad segura de viento que especifica el fabricante del AG, las rpm del generador se obtuvieron de la caracterización de este (véase Tabla 3.2) y el radio del rotor se obtuvo con medición de este con la ayuda de un vernier digital.

Para la fabricación de esta torre se empleara tubería estructural de acero 1020, asi como placas de acero de la misma. Como primer paso se determinan las fuerzas que actúan sobre el rotor y la torre. Cabe mencionar que el peso del AG y la fuerza que actúa sobre el rotor se desprecian. De acuerdo con la Ecuación 2.90 se tiene:

$$F_R = \frac{1}{2}\rho_{aire}\pi v^2 R^2 C_T(\lambda)$$
$$\Rightarrow F_R = (\frac{1}{2})(\pi)(1{,}185)(50)C_T(\lambda)$$

Donde: $\lambda = \dfrac{(43{,}46)(53{,}213 \times 10^{-3})}{50} = 0{,}046252$

$\Rightarrow \lambda = 0{,}13$ según la Figura 2.42

$$\therefore F_R = 0{,}6438N$$

La fuerza que actúa sobre la torre se obtiene de la Ecuación 2.92. El diámetro de la tubería es $D = 4{,}19in = 106{,}426 \times 10^{-3}m$ y un espesor $t = 3mm$

$$F_v = \frac{1}{2}\rho_{aire} D_{cilindro} v^2 C_e = (\frac{1}{2})(1{,}185)(106{,}426 \times 10^{-3})(50^2)(1{,}40)$$

Se utiliza 1.40 de acuerdo a la Figura 2.43

$$\therefore F_v = 220{,}7009 \approxeq 221N/m$$

Esta carga se modela como una carga uniforme. Para llevar a cabo el cálculo de las reacciones en la base de la torre, esta se modela como viga en voladizo. Como se muestra en la Figura 3.49.

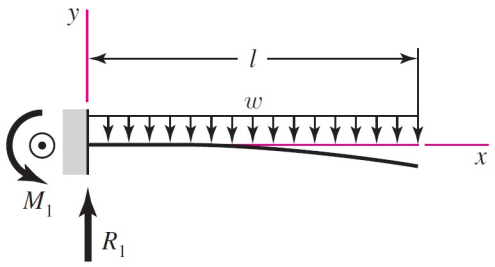


Fig. 3.49: Viga en voladizo con carga uniforme.[11]

Donde la reacción R_1 y el momento M_1 están dados por las Ecuaciones 3.5 y 3.6:

$$R_1 = wl \tag{3.5}$$

$$M_1 = \frac{wl^2}{2} \tag{3.6}$$

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector para este tipo de viga se muestran en las Figuras 3.50 y 3.51.

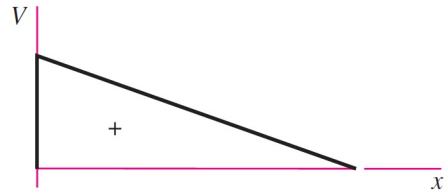


Fig. 3.50: Diagrama de fuerza cortante.[11]

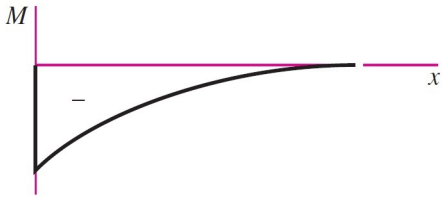


Fig. 3.51: Diagrama de momento flector.[11]

El valor del cortante máximo y el momento flector máximo se obtienen con las Ecuaciones 3.7 y 3.8:

$$V = w(l - x) \tag{3.7}$$

$$M = -\frac{w}{2}(l - x)^2 \tag{3.8}$$

Cuando $x = 0$ ocurre el cortante y el momento máximo, por lo tanto:

$$V = w(l - x) = wl = (221N/m)(2{,}15m) = 475{,}15N$$
$$M = -\tfrac{w}{2}(l - x)^2 = -\tfrac{w}{2}(l)^2 = -\tfrac{221N/m}{2}(2{,}15m)^2 = -510{,}78625N \cdot m$$

De acuerdo con la Ecuación 2.95, el valor de I se calcula a partir de la Ecuación:

$$I = (\frac{\pi}{64})(D^4 - d^4) \tag{3.9}$$

$$\therefore I = (\tfrac{\pi}{64})((106{,}426 \times 10^{-3})^4 - (103{,}426 \times 10^{-3})^4) = 6{,}8059 \times 10^{-7} m^4$$

El área de la sección transversal de la viga esta dada por la Ecuación 3.10:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \tag{3.10}$$

$$\therefore A = \frac{\pi}{4}((106{,}426 \times 10^{-3})^2 - (103{,}426 \times 10^{-3})^2) = 4{,}944 \times 10^{-4} m^2$$

NOTA: D y d se refieren al diámetro mayor y menor de la sección transversal.

El valor de los esfuerzos normal se obtienen mediante la Ecuación 2.95.

$$\therefore \sigma_{max} = \frac{(510{,}78625)(53{,}213 \times 10^{-3})}{6{,}8059 \times 10^{-7}} = 39{,}9366 MPa$$

Mientras que el esfuerzo cortante con la Ecuación 3.11

$$\tau = \frac{2V}{A} \tag{3.11}$$

$$\tau = \frac{2V}{A} = \frac{(2)(475{,}15N)}{4{,}944 \times 10^{-4} m^2} = 1{,}922 MPa$$

Los esfuerzos calculados corresponden a un estado de esfuerzo plano como el que se muestra en la Figura 3.52;donde:

$$\sigma_x = 39{,}9366 MPa \ \tau_{xy} = 1{,}9221 MPa$$

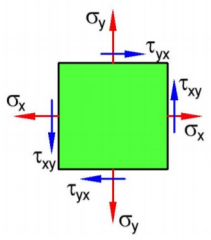


Fig. 3.52: Estado de esfuerzo plano

El valor de σ_y es igual a cero, ya que no existe esfuerzo normal en ese plano.A partir del estado de esfuerzo se puede construir el circulo de Morh para esfuerzo plano. El modelo propuesto para la torre del AG se muestra en Figura 3.53, este modelo cumple con las condiciones necesarias para montar el AG e implementarlo. Dicho modelo consta de una altura de 2.15 metros y un diametro de 4.19 pulgadas, en la parte superior descasa el AG.

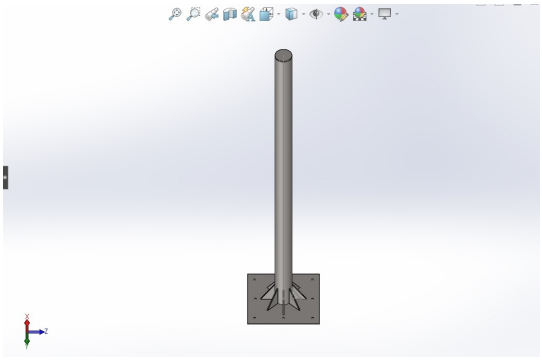


Fig. 3.53: Modelo en Solidworks de la torre propuesta

Con ayuda de Solidworks Simulation se configuro la viga como viga en voladizo para obtener los diagramas de cortante y momento flector estos diagramas se muestran en las Figuras 3.54 y 3.55.

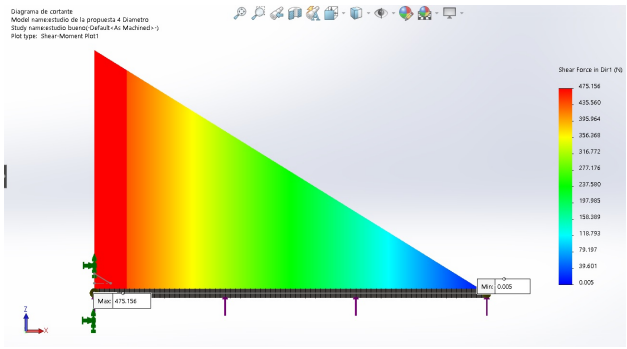


Fig. 3.54: Diagrama de fuerza cortante en Solidworks

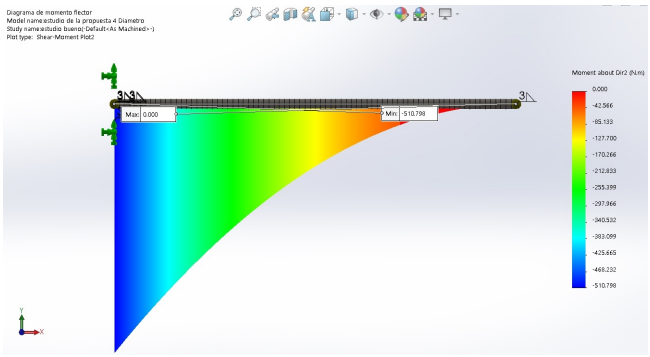


Fig. 3.55: Diagrama de momento flector en Solidworks

En las Figuras 3.54 y 3.55 se observa que el valor máximo del cortante y el momento flector coinciden con el calculado con las ecuaciones. Los resultados de desplazamiento, esfuerzo axial y desformación se muestran en las Figuras 3.56, 3.57 y 3.58 respetivamente. Para realizar la

simulación en Solidworks es necesario hacer ciertas configuraciones en el software, como lo son: La sujeción del elemento, tipo de material aplicado (para este caso AISI 1020), tipo de carga y la calidad de la malla de elemento finito con la que se ejecutara la simulación. Como se puede ver en las Figuras citadas, los valores máximos y mínimos para cada simulación se pueden apreciar en la barra de colores colocada en el lado derecho de cada Figura.

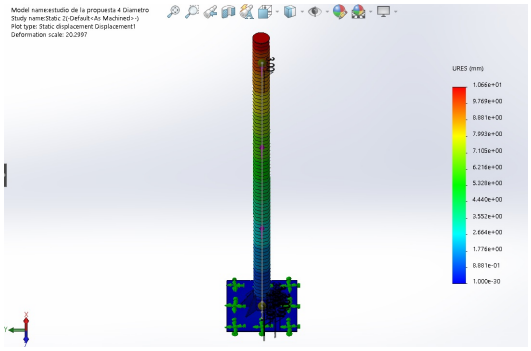


Fig. 3.56: Desplazamiento de la torre en Solidworks

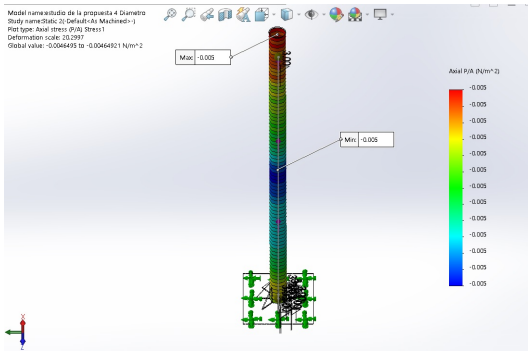


Fig. 3.57: Simulación de esfuerzo axial de la torre en Solidworks

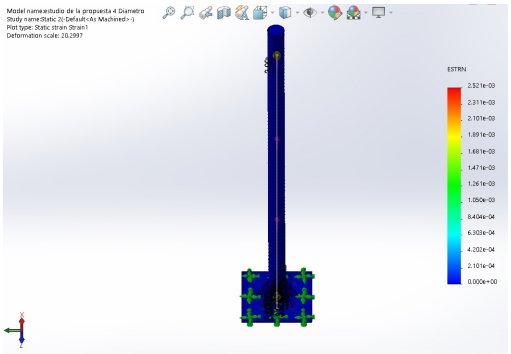


Fig. 3.58: Simulación de deformación de la torre en Solidworks

3.8 Etapa de conversión de CD

Consideraciones

El aerogenerador se seleccionó por las características mencionadas anteriormente, se observó que el voltaje varía desde los 6 volts hasta poco más de 12, pero es preciso mencionar que el presente estudio es parte de un proyecto mayor, donde lo que se hará es adecuar el voltaje variable del aerogenerador y elevarlo, además de mantenerlo en 24 volts.

Selección del convertidor

El circuito necesario para adaptar el aerogenerador de 12 volts a 24 se diseñará y se implementará un circuito convertidor de corriente continua a corriente continua elevador de voltaje (Boost), el cual multiplica la entrada por un factor dado por el ciclo de trabajo D

Establecimiento de datos

El convertidor se calculó para un voltaje Vs de entrada promedio de 9 v y este proporcione un voltaje constante o promedio de salida de 24 volts. Los cálculos se hicieron para una carga en la salida de 10 a 100 Ohms ya que la compensación la hace el control del ciclo de trabajo. Se usó una frecuencia de 1 khz de manera arbitraria.(Tabla 3.5)

Tab. 3.5: Convertidor

Variable	Valor
V_s	9
V_o	24
R	10-100 Ω
f	1 khz
V_{riso}	1 %

Calculo de componentes y parámetros

La ecuación del voltaje de salida está dado por:

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \tag{3.12}$$

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} \tag{3.13}$$

Y sustituyendo los valores de los voltajes de entrada y salida conocidos, obtenemos un valor de 0.65 o 65 % del ciclo de trabajo. Se consideró una frecuencia arbitraria de 20 kHz y se sustituyó en la siguiente ecuación para obtener el valor de inductancia mínima de la bobina.

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \tag{3.14}$$

El valor mínimo sería de 110 $\mu Henrios$ pero por sugerencia del libro consultado se maneja un 30 % más del valor mínimo para tener un margen para asegurar corriente permanente. Así que el valor de la bobina quedó en 143 $\mu Henrios$. Después se calculó el capacitor con base al valor del voltaje de riso propuesto de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} < 1\,\% \tag{3.15}$$

Sustituyendo valores y despejando C se obtuvo un valor de 62.5 μf.

El circuito quedó de la siguiente manera (Figura 3.59):

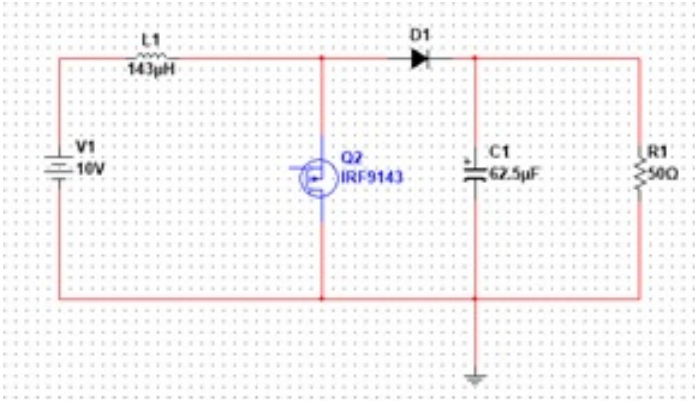


Fig. 3.59: Circuito resultante en proteus.

El interruptor

Para hacer a la conmutación se usará un transistor.

El diagrama

Para el control se usó una tarjeta Arduino UNO, quien ordena activar y desactivar el transistor. Además de que monitorea la salida para establecer el ciclo de trabajo del transistor. El circuito quedó de la siguiente forma (Figura 3.60):

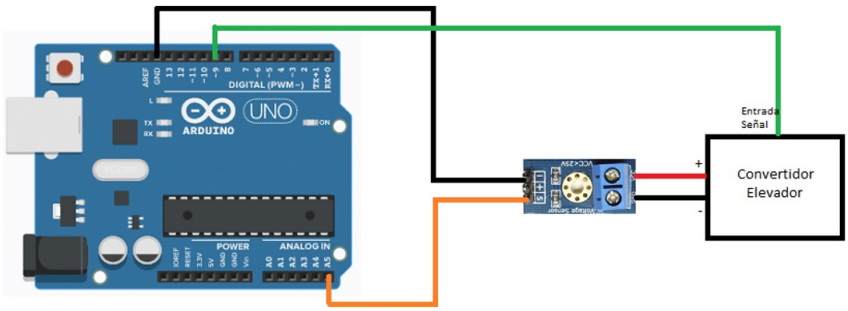


Fig. 3.60: Tarjeta controladora conectada al elevador.

El programa

En la programación se usó el IDE de arduino por su interface amigable e intuitiva con el usuario. El programa lee el detector de voltaje conectado al pin 9 del Arduino y hace una conversión del valor de 0 a 1023 a un valor de 0 a 25 (que es el voltaje), se agregó una condición comparando el voltaje de salida del convertidor con 24 volts deseados, si la lectura está por debajo de los 24 volts se le suma una centésima al ciclo de trabajo (que equivale al 1 %) y manda llamar una función que genera un ciclo, si el voltaje es mayor se le resta una centésima del ciclo de trabajo. El programa quedó de la siguiente manera (Figura 3.61):

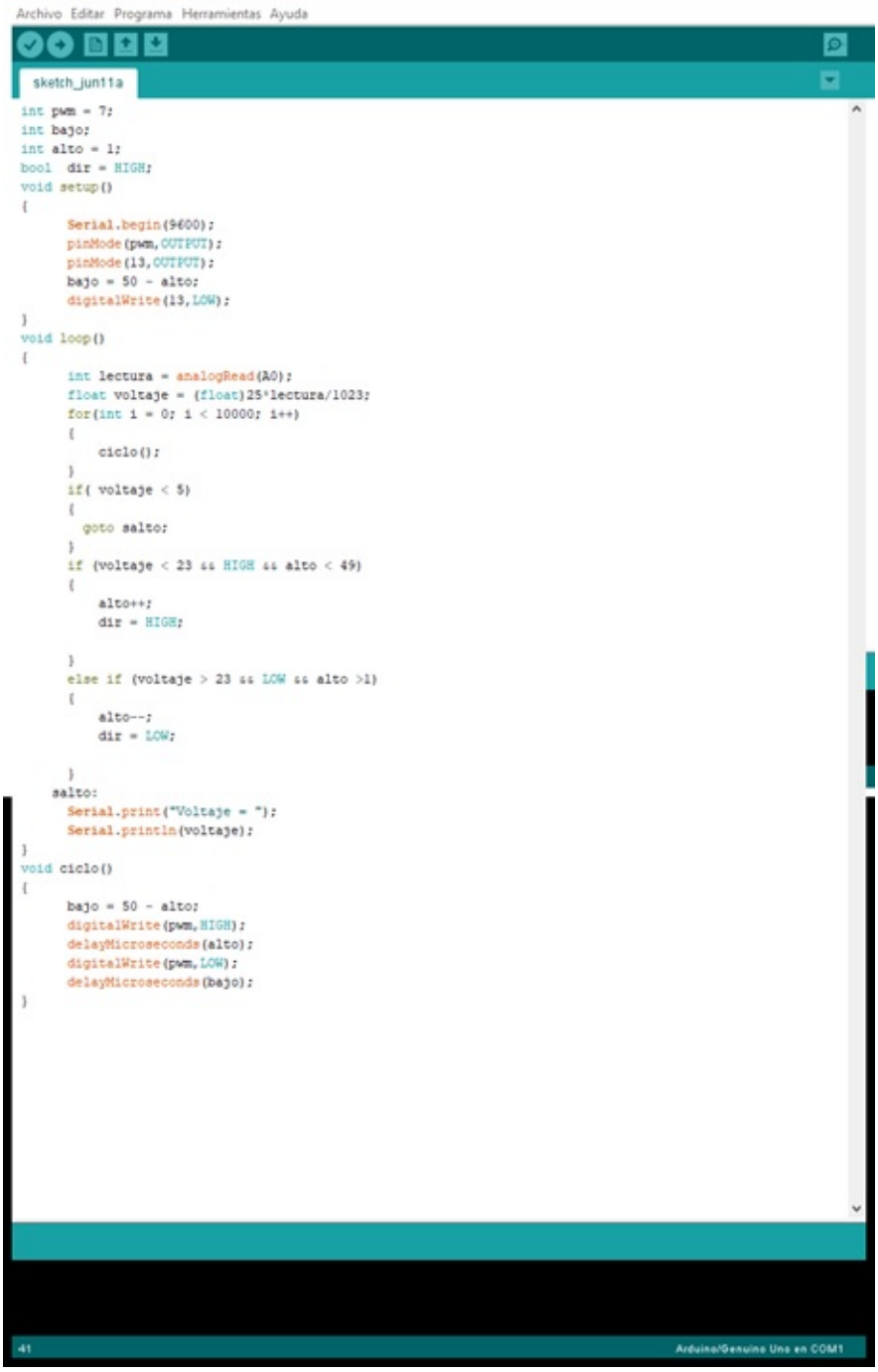


Fig. 3.61: Programa en IDE de Arduino.

4. RESULTADOS

Después de aplicar fibra a las palas del AG y al hub, se les aplico una capa de pintura anticorrosiva con la finalidad de proteger a estas de ambientes agresivos. El hub y las palas terminadas se pueden ver en la Figura 4.1.



Fig. 4.1: Palas y hub terminados

Para construir el circulo de Morh se emplean las ecuaciones descritas en el Capítulo 2; el centro del círculo esta dado por la Ecuación 2.97:

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{39{,}9366}{2} = 19{,}9683 MPa$$

El centro esta en $(\sigma_{prom}, 0)$ y el valor del radio del circulo se obtiene con la Ecuación 2.98.

$$R = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{(\frac{39{,}9366}{2})^2 + 1{,}9221^2} = 20{,}060 MPa$$

Los esfuerzos principales se obtienen con la Ecuación 2.100:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} = 40{,}02889 MPa$$
$$\sigma_{min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} = 0{,}0922950 MPa$$

La orientación de los planos principales de esfuerzo se calculan con la Ecuación 2.99:

$$tan2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$
$$\Rightarrow tan2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x} = \frac{2(1{,}9221)}{39{,}9366}$$
$$\Rightarrow 2\theta_p = tan^{-1}(\frac{2(1{,}9221)}{39{,}9366}) = 5{,}49821^0 \therefore \theta_p = 2{,}7491^o$$

La orientación del plano que contiene el esfuerzo cortante máximo según la Ecuación 2.101 es:

$$\Rightarrow 2\theta_s = tan^{-1}(\frac{\sigma_x}{2\tau_{xy}}) = tan^{-1}(\frac{39{,}9366}{2(1{,}9221)}) = 84{,}504^o$$
$$\therefore \theta_s = 42{,}2509^o$$

El valor del esfuerzo cortante máximo se obtiene mediante la Ecuación 2.102:

$$\tau_{max} = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + (\tau_{xy})^2}$$
$$\tau_{max} = \sqrt{(\frac{39{,}9366}{2})^2 + 1{,}9221^2} = 20{,}0605MPa$$

Dado el valor de $\theta_p = 2{,}7491^o$, el esfuerzo correspondiente a esa orientación es:

$$\sigma_x^{'} = \frac{39{,}9366}{2} + \frac{39{,}9366}{2}Cos(2{,}7491) + 1{,}9221Sin(2{,}7491) = 40{,}0058MPa \tag{4.1}$$

Se concluye que los esfuerzos $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ y τ_{max} son menores que el limite del resistencia del material, con esto se comparan con el S_{ut} (resistencia a la tensión) del material con que el se fabrica la torre, en este caso para el Acero 1020 $S_{ut} = 440MPa$. El circulo de Morh es similar al que se presentó en la Figura 2.50, para este caso el círculo de Morh se presenta en la Figura 4.2.

El límite S_{ut} del material se ve modificado debidos factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, el nuevo límite S_e (limite de resistencia de un elemento de máquina particular sujeto a cualquier tipo de carga) se obtiene con la Ecuación 2.104.

Se tiene que $S_{ut} = 440MPa$ para el acero 1020, entonces:

$$S_e^{'} = 0{,}5S_{ut} = 0{,}5(440MPa) = 220MPa$$

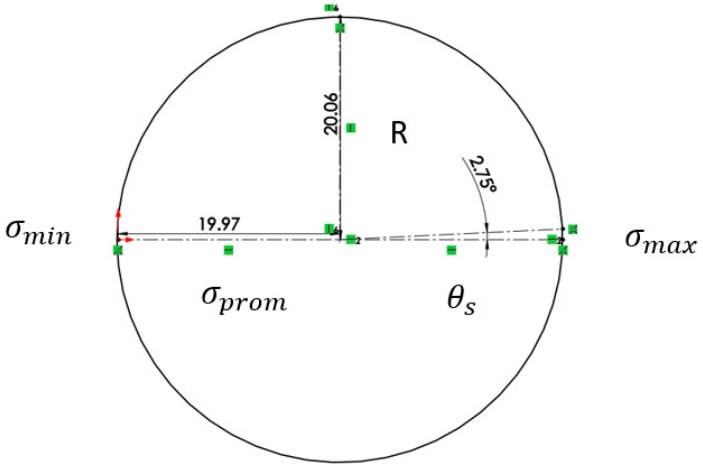


Fig. 4.2: Circulo de Morh

Para los factores K se calculan:

Factor K_a

Se emplea la Ecuación 2.105:

$K_a = 57{,}7(440)^{-0{,}718} = 0{,}7297$

Factor K_b

Conforme a la Ecuación 2.106:

$K_b = 0{,}91d^{-0{,}157} = 0{,}9(4{,}19^{-0{,}157}) = 0{,}71871$

Para K_c y K_d se tiene un valor igual a 1. Para K_e se estima un valor de confiablidad de 99.99 con lo cual el valor de $K_e = 0{,}702$ y para el de efectos varios K_f es igual a 1.

Sustituyendo el valor de $S_e^{'}$ en la Ecuación 2.104

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e^{'} = (0{,}7297)(0{,}71871)(1)(1)(0{,}702)(1)(220) = 80{,}9949 MPa$$

De acuerdo con el valor de S_e y el valor de σ_{max} se concluye que el elemento en cuestión soporta la carga. Para comprobarlo se presenta el díagrama esfuerzo-deformación del acero 1020 (ver

Figura 4.3), comparando el valor de S_e en el díagrama se encuentra dentro de la región elastica, es decir, donde el material puede deformarse y volver a recuperar su forma.

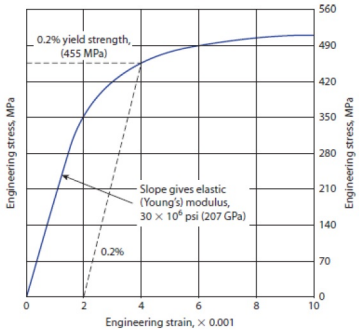


Fig. 4.3: Díagrama esfuerzo-deformación del acero 1020

La torre fabricada para el AG se presenta en la Figura 4.4.



Fig. 4.4: AG montado en la base diseñada y fabricada

La base de la torre se muestra en la Figura 4.5, la cual consta de ocho nervios y perforaciones para el anclaje de esta.

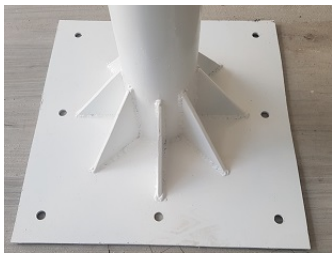


Fig. 4.5: Base de la torre

Para montar el AG se empleron cuatro tornillos, los cuales se colocaron en la parte superior de

la torre como se puede ver en la Figura 4.6.



Fig. 4.6: Base para el montaje del AG

Respecto a la base de montaje se debe de calcular la fuerza que ejerce el aire en ella y el peso del AG, con la finalidad de seleccionar un material que resista al esfuerzo producido por las fuerzas, para seleccionar un material se debe de considerar los materiales comerciales con lo que están fabricadas las tuberías.

4.1 Análisis de elemento finito en compenentes seleccionados para mejora

Antes de iniciar cualquier análisis de elemento finito, es necesario contar con la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre el objeto en cuestión, para este caso se necesita calcular la fuerza que ejerce el aire sobre la pala del AG, para calcular dicha fuerza, se debe de contar con el área de la pala, de acuerdo con Solidworks es de 51.96 pulgadas cuadradas (véase Figura 4.7) , lo que es igual a 0.033522514 metros cuadrados.

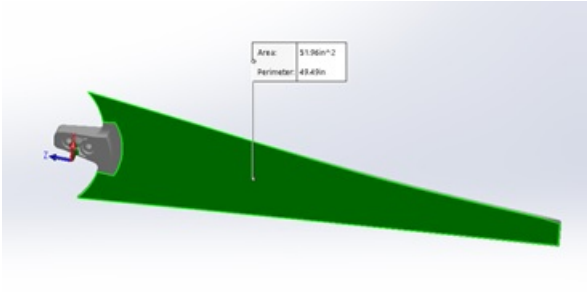


Fig. 4.7: Área de captación de la pala del AG

Con la ayuda de la herramienta de medición en Solidworks se puede obtener el valor del área

de incidencia de aire, el calculo de la fuerza del aire se puede ver en la Figura 4.8

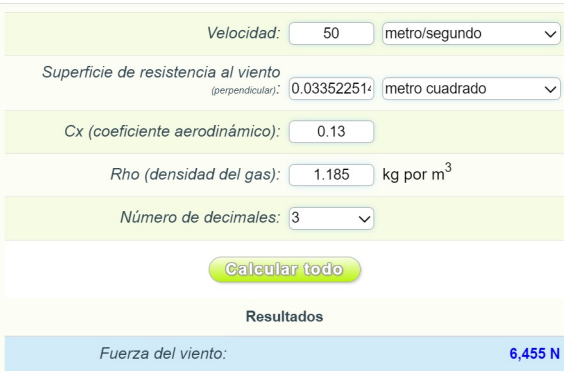


Fig. 4.8: Fuerza ejercida en una cara de la pala del AG

Se tiene una fuerza del viento de 6.455 N, este valor se agrega a Solidoworks simulation, como se muestra en la Figura 4.9. Recordar que Solidoworks simulation es un asistente de elemento finito.

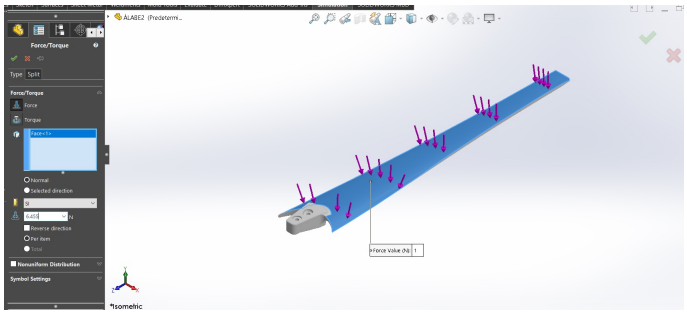


Fig. 4.9: Aplicación de la fuerza ejercida en Solidworks

Para esta simulación el material seleccionado es PVC, cabe mencionar que este material esta dentro de la biblioteca de materiales que proporciona Solidworks, además de aplicar un material es importante aplicar sujeciones a la pala (véase Figura 4.10)

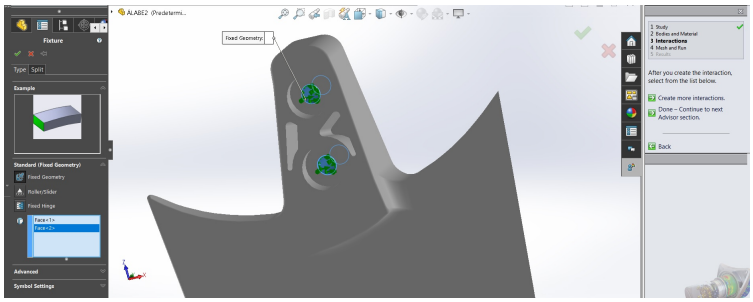


Fig. 4.10: Sujeción de la pala en Solidworks

Las sujecciones se agregan en donde los tornillos sujentan a las palas a la base que se monta en el eje del AG. Otro parámetro importante en el análisis de elemento finito, es la malla que se le aplica al elemento, la malla aplicada a la pala se muestra en Figura 4.11.

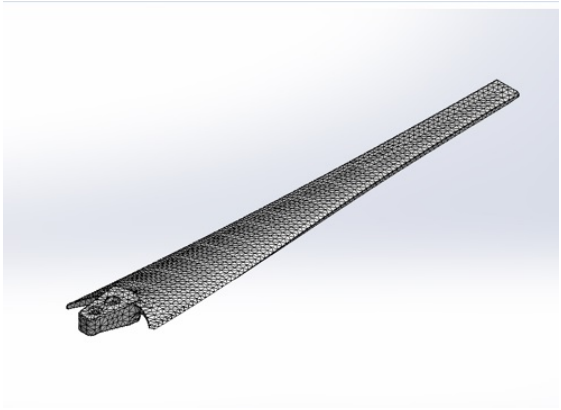


Fig. 4.11: Mallado de la pala en Solidworks

El esfuerzo de von Mises generado en la pala al igual que los valores máximos (2.267 MPa) y mínimos de dicho esfuerzo, se muestran en la Figura 4.12

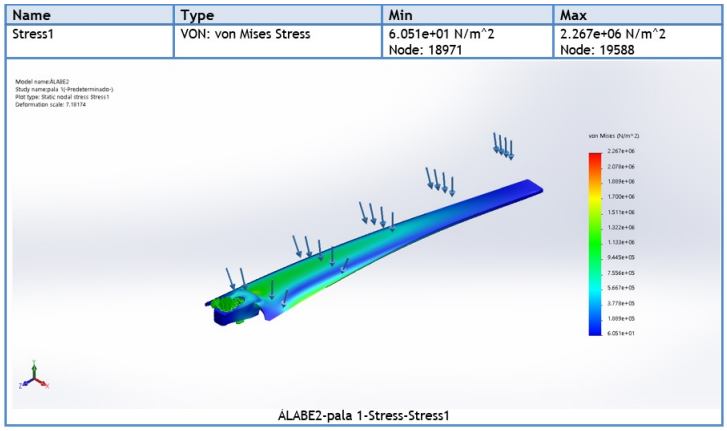


Fig. 4.12: Esfuerzo de Von Mises en la pala de PVC

El desplazamiento producido por la fuerza en la pala, se puede ver en la Figura 4.13, el valor máximo del desplazamiento es 8,096mm.

El otro material propuesto para las palas, fue la fibra de vidrio tipo E, para efectuar la simulación es necesario contar con las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio. Estas propiedades se insertan en Solidworks para crear un material, la Figura 4.14 muestra los datos requeridos para crear un material en Solidworks.

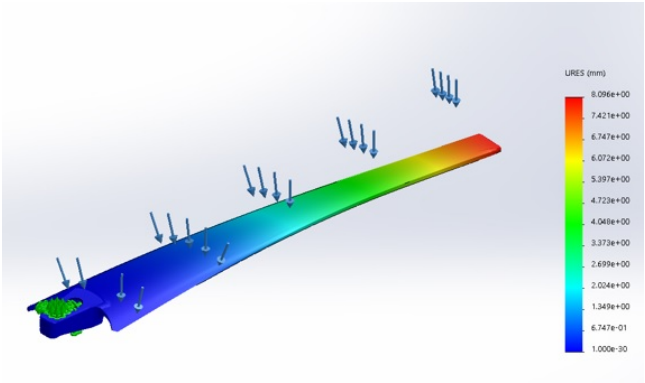


Fig. 4.13: Desplazamiento de la pala

Se eligieron los materiales de PVC y fibra de vidrio puesto que son materiales de bajo costo y accesibles, además de que son ligeros y fáciles de trabajar.

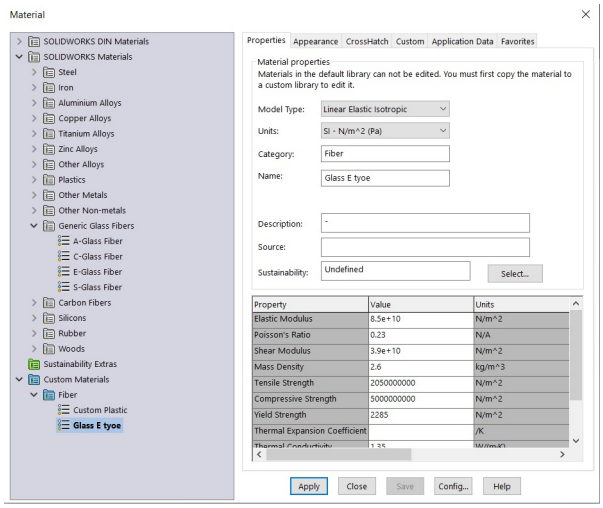


Fig. 4.14: Creación de un nuevo material en Solidworks

Los valores insertados son:

1) Modulo elástico

2) Relación de Poisson

3) Densidad de masa

4) Fuerza de tensión

5) Fuerza de compresión

6) Limite elástico

Para la simulación de este material (fibra de vidrio) se aplica la misma fuerza y sujeciones de la pala que en el caso anterior (PVC); el esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.15.

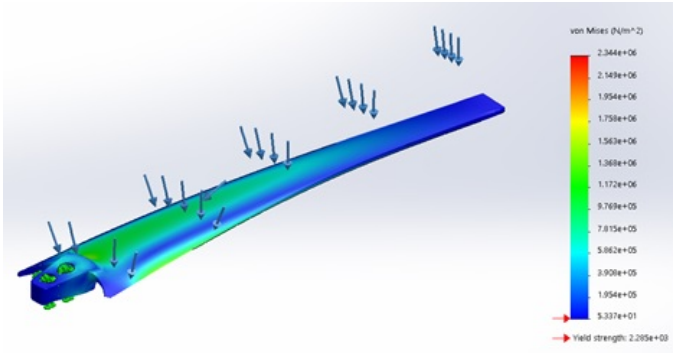


Fig. 4.15: Esfuerzo de Von Mises en pala de fibra de vidrio

Los valores mínimos y máximos para el caso del esfuerzo de Von Mises son 53.37 Pa y 2.344 MPa, respectivamente. Con lo que respecta al desplazamiento, este se puede ver en la Figura 4.16.

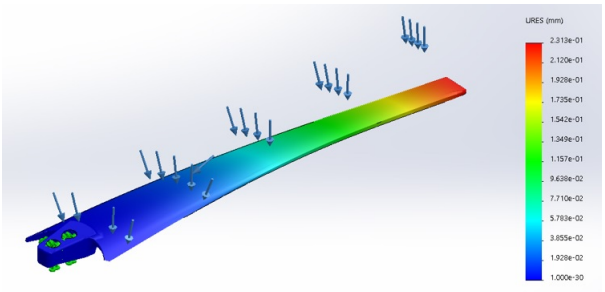


Fig. 4.16: Desplazamiento en pala de fibra de vidrio

El valor mínimo para el desplazamiento es de 0.0 mm y el valor máximo de 2.313 mm. Para la deformación de pala de PVC se obtuvo un valor máximo de 8.096 mm contra 2.313 mm de la pala de fibra de vidrio. Al realizar el estudio de propiedades mecánicas se podrá determinar las propiedades mecánicas del nuevo material compuesto y con esto determinar la deformación del nuevo material para compararla con los valores citados con anterioridad.

Con lo que respecta al análisis de elemento finito de la pala; para la pala de material de PVC se obtuvo un valor de esfuerzo máximo de Von Mises de 2.267 MPa contra 2.344 MPa de la

pala de fibra de vidrio, estos valores son casi iguales. Entonces con la finalidad de mejorar las palas del AG, se propone un material compuesto de PVC y fibra de vidrio, para aumentar la rigidez y evitar la flexión de las palas por grandes fuerzas, además de proteger a las palas de los rayos UV del sol y de la corrosión. Para poder determinar si es factible o no se deben estudiar las propiedades mecánicas del material compuesto propuesto, por esta razón se construyeron las probetas de materiales compuesto para ser instrumentadas y determinar las propiedades del material con la técnica de extensometria eléctrica. Comparando el diagrama esfuerzo de la Figura 2.13 en el capítulo dos y la Tabla 2.1, se tiene un valor máximo de esfuerzo para la fibra de vidrio de 3.6 GPa, la simulación ejecutada proporciono un valor de 2.344 MPa, con esto se concluye el esfuerzo en la pala se encuentra dentro de la región elástica del material.

El otro elemento a analizar mediante elemento finito es el hub del AG, para ello se utiliza la misma fuerza de 6.455 N y los mismos materiales: PVC y fibra de vidrio. El proceso para realizar el análisis de elemento finito es el mismo que se aplico a la pala, el esfuerzo de Von Mises en el hub, se muestra en la siguiente Figura 4.2. Como primer material se utilizo la fibra de vidrio.

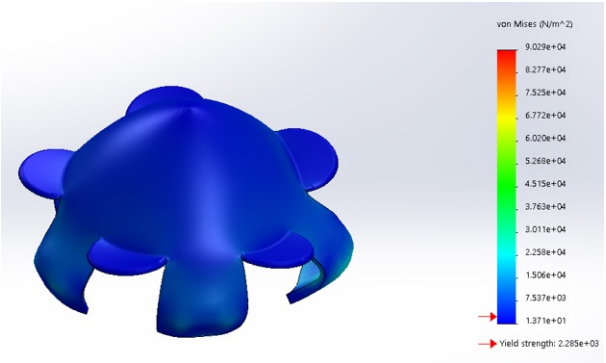


Fig. 4.17: Esfuerzo de Von Misis en hub de fibra de vidrio

Para el esfuerzo de Von Mises se tiene un valor mínimo de 13.71 Pa y un máximo de 90.29 KPa. Comparando el diagrama esfuerzo de la Figura 2.13 en el capítulo dos y la Tabla 2.1, se tiene un valor máximo de esfuerzo para la fibra de vidrio de 3.6 GPa, la simulación ejecutada proporciono un valor de 90.29 KPa, con esto se concluye el esfuerzo en la pala se encuentra dentro de la región elástica del material. El desplazamiento que se produce en el hub se presenta en la Figura 4.18.

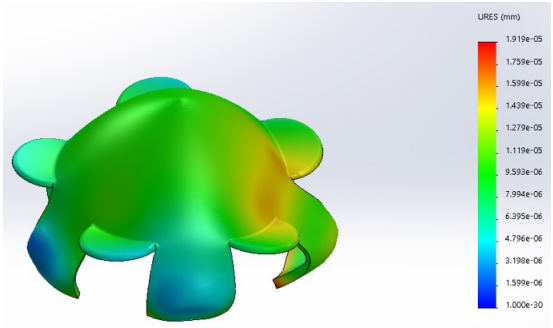


Fig. 4.18: Desplazamiento del hub de fibra de vidrio

El desplazamiento mínimo es de 0.0 y el máximo de $1{,}919x10^{-5}mm$.Para el caso del hub de PVC a continuación se presenta el esfuerzo de Von Mises.

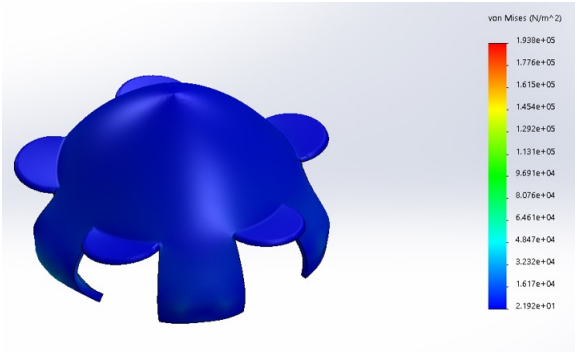


Fig. 4.19: Esfuerzo de Von Mises en hub de PVC

Los valores mínimos y máximos respecto al esfuerzo de Von Mises son: 21.92 Pa y 193.8 KPa. El desplazamiento del hub debido a la fuerza, se presenta en Figura 4.20.

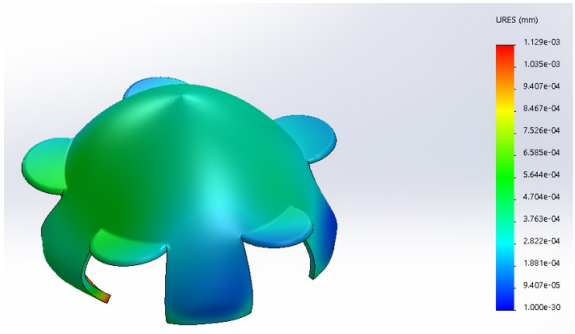


Fig. 4.20: Desplazamiento en hub de PVC

Para el desplazamiento se tiene un máximo de $1{,}129x10^{-3}mm$.

4.2 Etapa de conversión de CD

El circuito para pruebas en el simulador Multisim (software de simulación de circuitos) quedó de la siguiente manera (Figura 4.21):

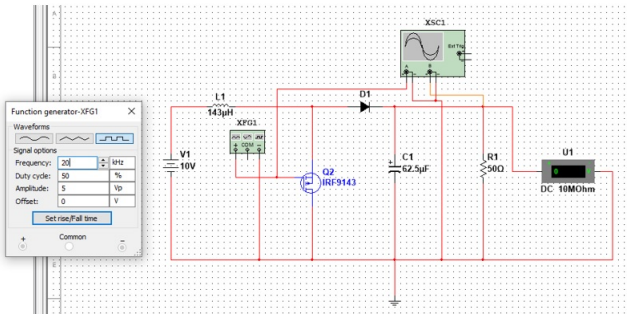


Fig. 4.21: Circuito en simulador.

Se conectó un generador de funciones para mandar la señal al transistor de activar y desactivar, se conectó un osciloscopio en la salida del generador y un voltímetro en la carga (salida del convertidor). Ademas, se hicieron varias pruebas a diferentes ciclos de trabajo, pero mismo voltaje de entrada (el que se usó para los cálculos). Quedando la Tabla 4.1 de la siguiente manera para una entrada de 9 volts.

Tab. 4.1: Ciclo de trabajo contra voltaje de salida (V_o).

D	V_o
0.1	9.2
0.2	11.84
0.3	14.88
0.4	18.03
0.5	21.05
0.6	23.97
0.7	27.08
0.8	34.57
0.9	33.58

La simulación arrojo un comportamiento lineal en los valores del ciclo de trabajo del 10 al 70 % como se muestra en la Figura 4.22.

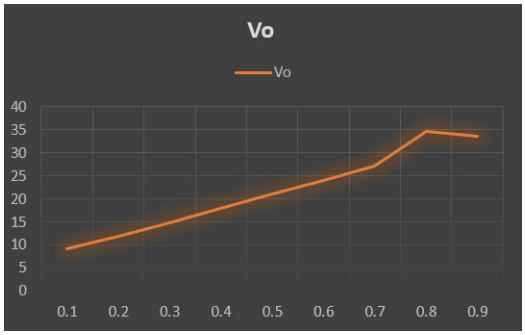


Fig. 4.22: Gráfica D contra V_o.

A ciclos de trabajo casi completo (100 %) deja de comportarse de forma lineal y tiene un pico y después baja, por lo tanto, se puede afirmar que el convertidor es eficiente en el rango de 10 al 70 %. A continuación, se mostrará el comportamiento del convertidor con un ciclo de trabajo del 50 % con valores de entrada variables, iniciando en 6 volts hasta el máximo que serían 12 para este trabajo.

Tab. 4.2: Voltaje de entrada contra voltaje de salida con 50 % del ciclo de trabajo

V_s	V_o
6	13.8
7	16.22
8	18.68
9	21.05
10	23.54
11	25.92
12	28.06

La Tabla 4.2 nos muestra la linealidad del convertidor como se había observado en la tabla anterior. En la Figura 4.23 se muestra gráficamente.

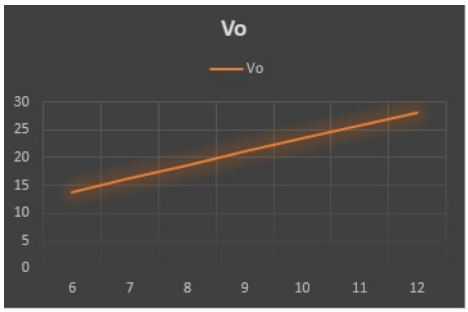


Fig. 4.23: Voltaje de entrada contra el de salida

Dicha linealidad se observa por las condiciones ideales en las que trabaja el simulador utilizado, se sabe que en el proceso influyen parámetros como caídas de voltaje en los componentes entre otras cosas. Para el circuito físico se buscaron componentes lo más parecidos a los de la simulación. El inductor se cambió por uno de 22 mH por ser la opción más cercana a la del diseño que se hallaba a la venta, el capacitor se sustituyó por uno de 47 μF, en este caso lo único que modifica es el voltaje de riso, el cual se diseñó para 1 %. La Figura 4.24 muestra el circuito armado el protoboard para pruebas.

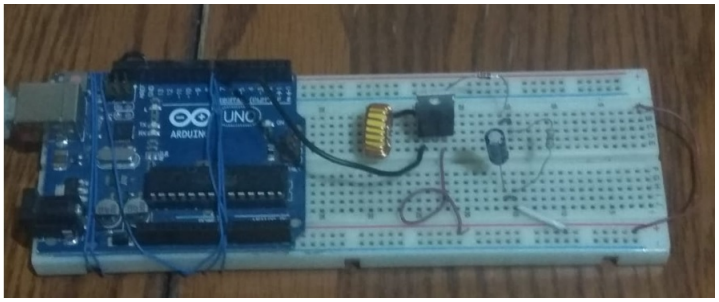


Fig. 4.24: Circuito elevador en protoboard.

Para las pruebas del circuito físico se usó una fuente de 5 volts y se tomaron lecturas. Se necesitó un programa (ver Fig. 4.3) para estar variando el ciclo de trabajo del transistor, el cual se varió desde 5 % al 95 % como se observa en la Tabla 4.3

Tab. 4.3: Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada.

Microsegundos en alto	Microsegundos en bajo	Porcentaje de ciclo de trabajo (%)	Voltaje de salida (V)
5	45	10	10
10	40	20	15
15	35	30	19.3
20	30	40	23.4
22	28	44	25
25	25	50	24
30	20	60	19
35	15	70	16.5
40	10	80	14.4
45	5	90	12.7

Cabe mencionar que la frecuencia de la señal PWM fue de 20 KHz con una resistencia de salida de 330 Ω ya que la resistencia del diseño de 100 Ω se quemó y no se contaba con otra de

reemplazo.



Fig. 4.25: Programa para el PWM.

Se puede observar en la Tabla 4.3 que a ciclos de trabajo muy bajos (hasta 20 %) el aumento en voltaje alcanza el doble y triple del voltaje de entrada, para el 40 % casi alcanzó el máximo para el cual está diseñado. Donde se observó el máximo voltaje de salida (mayor aumento de voltaje) fue al 44 % donde se alcanzaron los 25 volts de salida. En las Figuras 4.26 y 4.27 se observa la medición del voltaje de entrada y la medición del voltaje de salida.

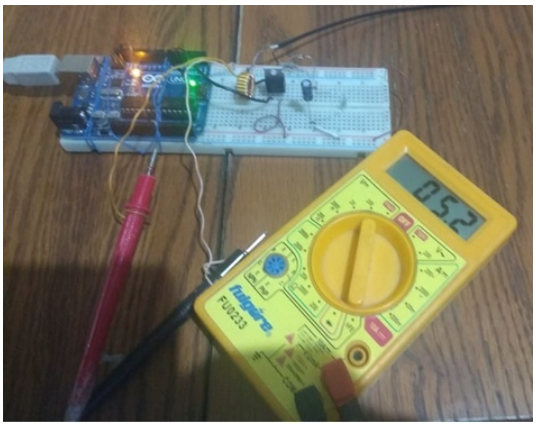


Fig. 4.26: Medición de la entrada (5.2 V)

Como ya se había comentado en el marco teórico el elevador ideal su salida seria infinita, pero en este caso (real) hay caídas de tensión en los transistores y diodos que afectan significativamente al funcionamiento.

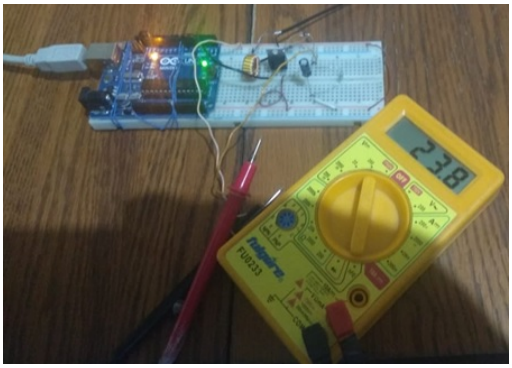


Fig. 4.27: Medición de la salida (23.8 V).

Por esta razón se observa una disminución en el factor de aumento del convertidor elevador, se puede ver que es a partir del 50 % donde se da dicha disminución. Esto es que eleva el voltaje, pero en menor proporción. Todo esto lo podemos observar en la gráfica de la Figura 4.28 a continuación.

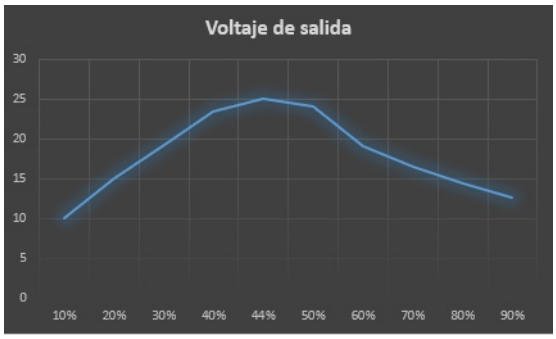


Fig. 4.28: Grafica % del ciclo de trabajo contra voltaje.

Se puede apreciar que la curva va en aumento hasta cierto % del ciclo de trabajo y después de ese punto su eficiencia comienza a disminuir, pero sigue elevando el voltaje.

Algo que se debe de mencionar es que la resistencia a la salida (RL) se estuvo calentando durante las pruebas, tanto que se quemó la de 100 Ω original del diseño. La forma en la que se arregló este problema fue usando una resistencia de 333 Ω y se desconectaba la tierra (GND) para cargar el programa con el valor del PWM (o el % de ciclo de trabajo), es decir, se desconectaba y luego se cargaba el programa y se volvía a conectar para tomar la medida del voltaje a la salida.

Otras pruebas que se hicieron fueron los mismos valores de entrada y % del ciclo de trabajo, pero con una resistencia de 100 Ω de 5 w (ver Figura 4.29). El problema siguió, pero aguanto más mediciones seguidas, el detalle fue que con esa resistencia los valores máximos no llegaron más que a 14 volts, es decir, poco menos de 3 veces el voltaje de entrada.

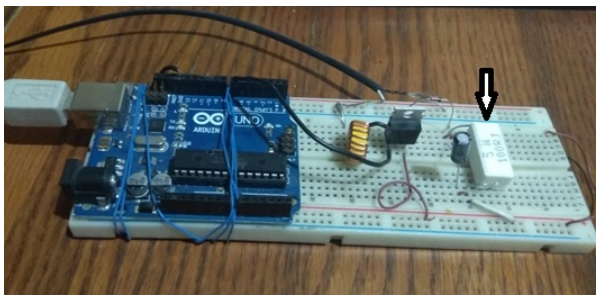


Fig. 4.29: 7 Circuito elevador con resistencia de 100 Ω de 5 W.

Se hicieron las mismas mediciones que con la resistencia de 330 Ω como se observa en la Tabla 4.4, la cual muestra el tiempo en alto de la señal que manda la tarjeta controladora y el tiempo en bajo, además de que porcentaje de trabajo representa y la salida del convertidor.

Tab. 4.4: Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada.

Microsegundos en alto	Microsegundos en bajo	Porcentaje de ciclo de trabajo	Voltaje de salida
5	45	10	6.9
10	40	20	9.3
15	35	30	11.6
20	30	40	13.8
22	28	44	14.7
25	25	50	12.7
30	20	60	10.4
35	15	70	9
40	10	80	7.8
45	5	90	6.9

Como se mencionó anteriormente el máximo aumento en voltaje fue de casi 3 veces el valor de la entrada lo cual lo hace menos eficiente que con la resistencia de las pruebas anteriores, cabe mencionar que la resistencia mostro calentamiento después de varios minutos de funcionamiento continuo. Como sucedió anteriormente el factor de elevación sube con el aumento en ciclo de trabajo, pero al alcanzar cierto valor (44 %) alcanza su valor máximo y después de este comienza

a bajar la eficiencia del elevador de voltaje como sucedió con las pruebas con la resistencia de 330 Ω , lo cual generó una curva en el funcionamiento como la que se muestra en la Figura 4.30.

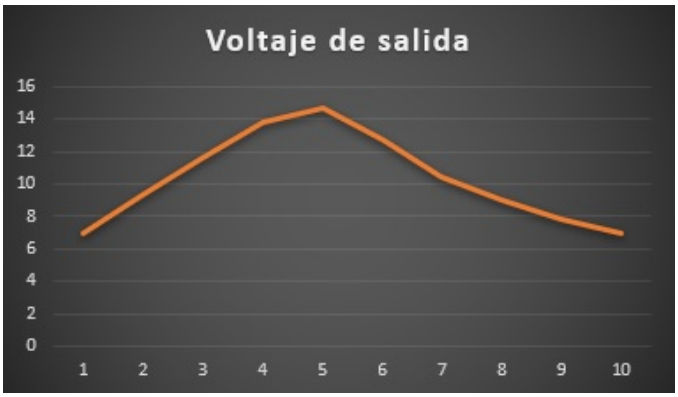


Fig. 4.30: Grafica % del ciclo de trabajo contra voltaje

Producto final

También se hicieron pruebas con una resistencia de 560 Ω de 5 W para soportar la corriente proporcionada por el elevador, el cambio resulto en una amplificación de voltaje mayor a porcentajes del ciclo de trabajo mas bajos. El circuito completo, elevador, tarjeta controladora y sensor de voltaje para las pruebas quedo de la siguiente manera como lo muestra la Figura 4.31.

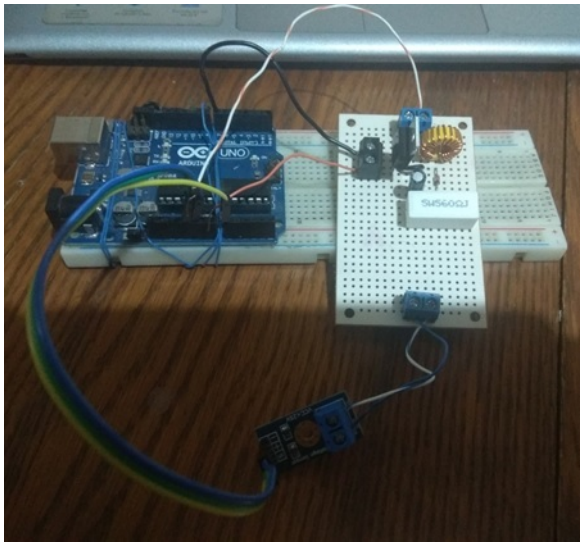


Fig. 4.31: Circuito completo con el elevador de voltaje, tarjeta controladora y sensor de voltaje.

Diagrama del producto final

El diagrama de conexión de tablero (producto final) quedó como se ilustra en la Figura 4.32.

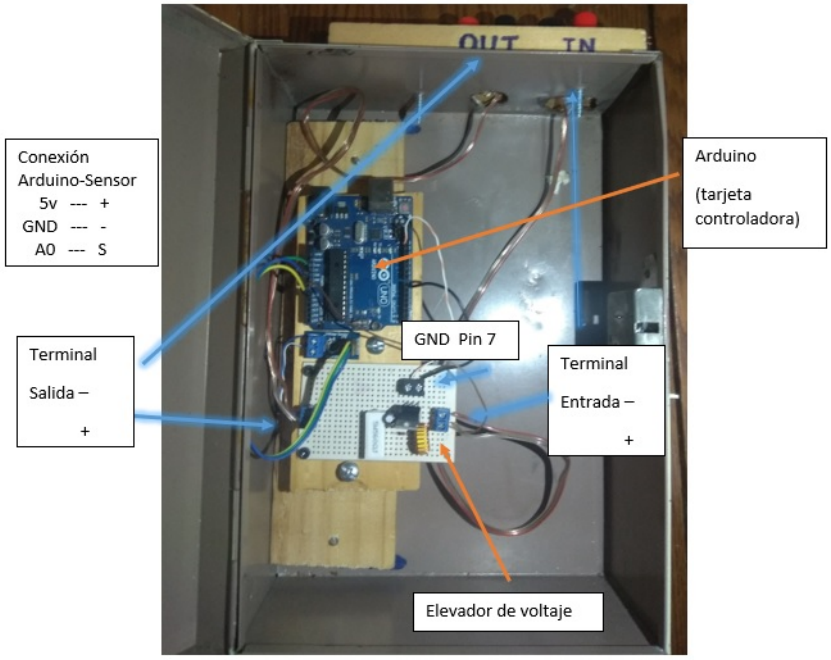


Fig. 4.32: Diagrama del prototipo final.

Para protejerlo de las inclemencias del clima entre otras cosas se instaló en una carcasa metalica y aislada del circuito con madera. Ademas se le agregaron los conetores tipo hembra para hacer la conexión de la entrada, es decir, el controlador de carga del aerogenerador y para la salida y conectar la bateria o cualquier sistema. En la Figura 4.33 se observa la caja completa y lista para instalarse cualquier pared.

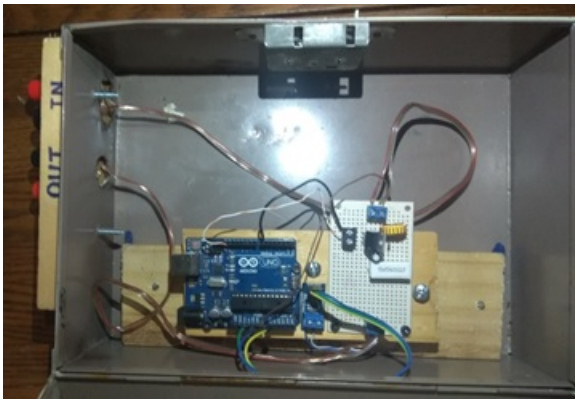


Fig. 4.33: Dispositivo elevador controlado por una tarjeta electronica terminado.

El circuito se atornillo a una madera y este a la carcasa (Figura 4.34).



Fig. 4.34: Carcasa contenedora del prototipo.

A la carcasa se le agregó un pedazo de madera para atornillarle las terminales entrada del elevador de voltaje y las terminales de salida del mismo (Figura 4.35).

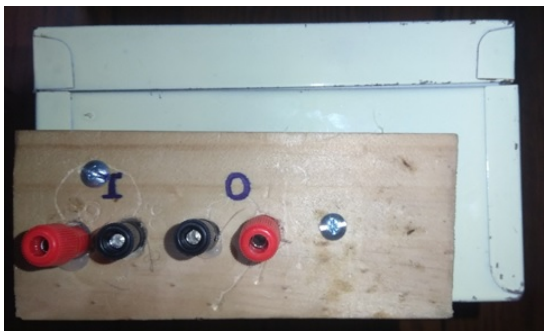


Fig. 4.35: Terminales de entrada y de salida.

Programa final

En el programa se utilizó una salida digital (7) y una entrada analógica (A0). Al principio del ciclo principal se lee el pin A0 donde se conectó el sensor de voltaje, el cuál entrega un voltaje proporcional de 0 a 5 volts que la tarjeta lo convierte a un valor de 0 a 1023, que a su vez se convierte por medio de una regla de 3 a un valor de 0 a 25 (que seria el voltaje medido), después lleva un ciclo que se hace 10,000 veces, el cuál tiene la señal PWM que va al elevador de voltaje. Se le agregaron 3 condiciones para limitar el funcionamiento, si el voltaje es menor de 5 volts se salta cualquier modificación del PWM, si el voltaje es menor de 24 volts se le suma

un microsegundo a ciclo en alto de la señal, si es menor se le baja un microsegundo. Al final se agrego la función del PWM. Una forma de hacer mas rapida la llegada al valor de la salida (24 volts) seria bajando el valor de 10,000 o subiendolo para que llegue mas lento al valor deseado. El programa quedó como en la Figura 4.36.

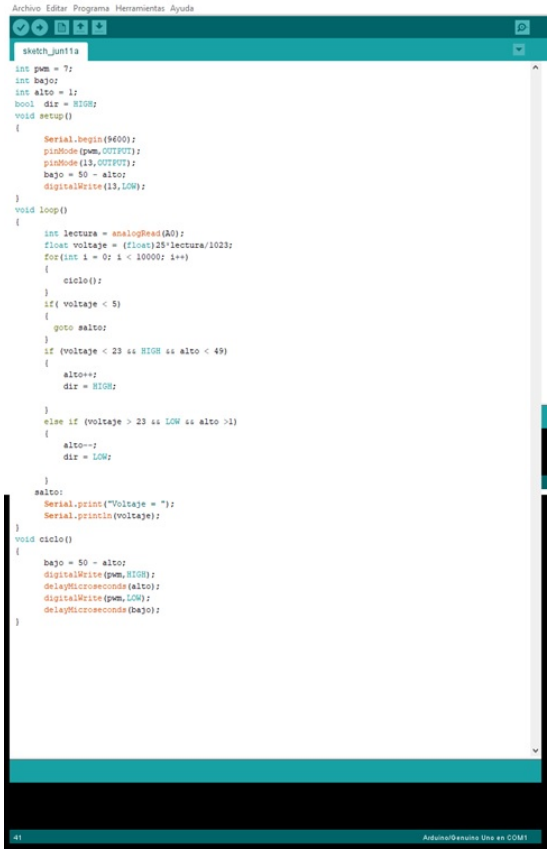


Fig. 4.36: Programa final.

La alimentación de la tarjeta controladora (que ocupa de 5 a 12 volts) fue tomada de la entrada (salida del controlador de carga), es decir, que cuando el aerogenerador produzca 5 volt la tarjeta se encenderá y comenzará la lectura del voltaje a la salida para variar el ancho de pulso para elevar el voltaje a 24 como se propuso en los objetivos.

Montaje del AG

Para las pruebas de generación de energía eléctrica con la energía del viento (con el aerogenerador) se instaló la base en el tercer piso de una vivienda hacia el sur de Ciudad

Obregón, ver Figura 4.37.



Fig. 4.37: Instalación del aerogenerador

Las pruebas se hicieron en junio cuando las características del viento según la página meteorológica windfinder es el mes con el promedio de viento más alto del año (ver Figura 4.38) aunque no es el mes con ráfagas de mayor velocidad.

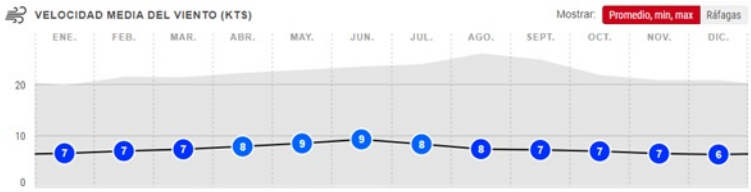


Fig. 4.38: Media de velocidad del viento según windfinder.

Las mediciones se hicieron con el controlador de carga mencionado anteriormente y en la salida se conectó un multímetro en modo de medición de voltaje como se ilustra en la Figura 4.39.

Se hicieron 8 mediciones en las horas que hay más viento, que fue de las 12 de medio día a las 16 horas (4 de la tarde), donde el viento oscilo desde los 10 hasta los 16 km/h o 2.78 m/s hasta los 4.44, que en realidad no fue un buen día para hacer pruebas ya que ha habido días con mayor viento durante el día. Las mediciones quedaron de la siguiente manera como se muestra en la Tabla 4.5.



Fig. 4.39: Mediciones de voltaje del aerogenerador.

Tab. 4.5: Mediciones del elevador de voltaje con 5 volts en la entrada

No. de medición	Hora	Velocidad del viento (m/s)	Voltaje (V)
1	13:00	2.78	1.6
2	13:30	2.78	1.8
3	14:00	4.17	4.6
4	14:30	4.17	4.5
5	15:00	4.44	5.1
6	15:30	4.44	5
7	16:00	3.89	4.5
8	16:30	3.89	4.7

Se observa que a las 3 de la tarde es la hora con mayor velocidad promedio del viento, aunque fueron velocidades bajas casi se llegó a la mitad de la generación nominal del aerogenerador. Es necesario mencionar que la altura del soporte junto con la altura de la vivienda no supera los 8 metros, aumentando esta altura se mejorarían los resultados. En las pruebas se alcanzan los 5 volts de generación, mismos que conectados al elevador de voltaje a un 44 % del ciclo de trabajo se alcanzarán según las pruebas los 24 volts esperados para esta tesis.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El diseño de un AG no es algo trivial, se necesita conocer las leyes con las que se inicia el proceso de diseño de un AG, antes de comenzar con la selección del AG, es muy importante aplicar las ecuaciones que rigen el comportamiento de estos, comenzando con el Teorema de Betz, con base a eso, se puede tener una idea más clara del dimensionamiento del AG. Para la selección del AG es recomendable verificar los modelos y tipos de Ag que existen en los distintos tipos de mercado; un factor muy importante es el costo de los AG y los materiales con los que estos están fabricados, entre más potencia generan más será el costo.

Otros factores que son importantes en la selección del AG, es el voltaje que genera el AG, y el lugar donde este será instalado. En la mayoría de los casos el voltaje del AG es en CD, ya sea en 12 o 24 V, esto se debe de considerar con el propósito de saber cuál es el voltaje del controlador y convertidor de carga, en este caso se adquirió un AG de 12 V ya que el AG de 24 V implicaba uno costo más elevado además de la falta de disponibilidad en el mercado, el AG implementado en esta tesis cumple con ciertas características como son la velocidad del viento y la potencia que genera.

Los parámetros mencionados con anterioridad tienen un papel importante en la selección del AG, no se puede implementar un AG en zonas donde el aire no es suficiente para mover las palas y este a la vez genere energía eléctrica, el AG utilizado tiene una velocidad de arranque baja, lo cual ayuda a generar energía eléctrica aun cuando exista una baja velocidad de aire en el medio, las características se mencionaron en el capítulo tres; cuando se selecciona un AG se

deben de tener los datos de la velocidad del aire en la zona donde se implementara, además de conocer el ambiente con la finalidad de considerar si los materiales del que está fabricado el AG permitan que este tenga una vida útil.

Como se menciono en los objetivos de esta tesis, se selecciono un AG que cumpliera con las características necesarias para ser implementado en una zona de anta concentración de salinidad y corrosión. Al AG seleccionado se les hicieron mejoras a dos de sus componentes principales las palas y el hub, a estos se les aplico fibra de vidrio como protección, con la finalidad de aumentar la vida útil del AG, además de aplicar pintura anticorrosiva como protección adicional. El procedimiento para aplicar la fibra de vidrio fue un poco tedioso ya que se tuvo que experimentar con distintas cantidades de secante para la resina; antes de aplicar la resina y la fibra a las piezas seleccionadas.

En el capítulo dos se menciono, la susceptibilidad de la fibra de vidrio a la corrosión varia de acuerdo al tipo de fibra que se utilice, para el recubrimiento de las palas y hub se utilizada fibra de vidrio tipo “E”, ya que este tipo de fibra de vidrio se utiliza como fibra de vidrio estructural principal, por lo cual esta ayuda a aumentar la rigidez en las palas y no aumenta en exceso el peso de estas. El uso de la pintura anticorrosiva se debe a que la fibra de vidrio tipo “E” es mas susceptible a la corrosión que los otros tipos, entonces con la finalidad de proteger a las palas y el hub de la corrosión y salinidad, es importante mencionar que la pintura utilizada es pintura marina, la cual es empleada para barcos. Por lo tanto se cumple con uno de los objetivos específicos de este trabajo de tesis.

Uno de los objetivos de este trabajo, además de mejorar un AG para ser implementado en una zona costera, es bajar los costos de fabricación, en el mercado existen AG que llegan a tener un costo de mas del doble del costo que tuvo realizar la mejora del AG. Un AG con las características de mejora que se realizaron llega a tener un costo aproximado de hasta 20,000.00 (M.N.) y este AG que se mejoro tuvo un costo de 8,300.00 (M.N) incluyendo la torre para montaje de este.

Es atractivo apostar por la mejora de un AG puesto que se puede tener un ahorro de más del 50 % del costo de uno ya adaptado a las condiciones deseadas. Es importante mencionar que los precios en el mercado local están en constante cambio, los precios de AG están en función de las características de estos, uno de los factores que elevan el costo de un AG es la potencia eléctrica que generan y el voltaje de CD (Corriente Directa) que estos entregan. Para el AG que se selecciono esta disponible en dos versiones, una que entrega 24 Volts y otra de 12 Volts ambos en CD, la versión de 12 Volts es la más económica entre estas. Por esta razón se eligió esa versión e implementar un elevador de voltaje de 12 a 24 Volts. Otro factor que influye en el costo es la velocidad a la cual el generador eléctrico comienza a generar potencia eléctrica, entre mas velocidad baja tenga, será más el costo. Se deben tener en consideración los parámetros a los cuales se tiene que adaptar el AG con la finalidad de no generar costos indeseados. Con lo que respecta a la parte de mejora del AG, se cumplió con los objetivos planteados en el capitulo uno de esta tesis.

El diseño se hizo con base a valores propuestos ya que no era necesario cumplir con una elevación fija en el convertidor, el sensor y el programa de la tarjeta controladora corrigieron los probables errores en los valores de los componentes, es decir, al detectar la tarjeta un voltaje de salida menor al esperado este aumenta la el ciclo de trabajo sin alterar la frecuencia de conmutación lo que hace que el factor eleve el voltaje, al detectar menos la frecuencia baja y se produce la elevación pero con un factor menor, el convertidor tuvo un comportamiento muy lineal (en la simulación) como se mostró en las gráficas. La máxima elevación que arrojo el convertidor fue al 80 % del ciclo de trabajo y fue de más de 3 veces el valor de la entrada. Es preciso decir que los simuladores toman algunos valores en condiciones ideales, lo que podría arrojar un error o las mediciones prácticas. Ya en el circuito en físico se comprobó el aumento en voltaje como se diseñó, con unos pequeño cambios y correcciones por los valores comerciales, además de que se tuvieron algunos problemas con los las resistencias de carga (salida) que no soportaban la corriente y se calentaban, problema que fue resuelto usando resistencias de 5 w. También podemos mencionar las condiciones de viento en la ciudad el día de las pruebas, que no hubo

ráfagas importantes para alcanzar valores nominales en la generación de electricidad. Con todo esto se les dio respuesta a los objetivos planteados en el capítulo 1 de este documento de diseñar y construir un circuito elevador de voltaje.

5.2 Trabajos futuros

Los trabajos futuros a partir de este trabajo de tesis se enlistan a continuación:

1) Instrumentación de probetas de materiales compuestos.

2) Determinación de las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas.

3) Análisis de elemento finito en las palas y hub del AG.

4) Estudio de corrosión en fibra de vidrio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Miguel Suau de Castro. Diseño y construcción de una mini-turbina eólica. *Universidad Politécnica de Madrid*, 2014.

[2] E Alexander Ossa, Felipe Cano, Juliana Arango, and Carolina Montoya. Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de fibras de vidrio y queratina. *Scientia et technica*, 1(36), 2007.

[3] TJ Myers, HK Kytömaa, and TR Smith. Environmental stress-corrosion cracking of fiberglass: Lessons learned from failures in the chemical industry. *Journal of hazardous materials*, 142(3):695–704, 2007.

[4] Alejandro Díaz Guerrero. Integración y consolidación de capacidades nacionales para el desarrollo de pequeños aerogeneradores, mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas de un aerogenerador de 20 kw ciateq a.c. *Tesis de licenciatura, Instituto Tecnologico Superior de Cajeme*, 2015.

[5] MA Pozueta. Puente de wheatstone. *Obtenido de http://personales. unican. es/rodrigma/PDFs/Puente*, 20, 2015.

[6] Miguel Yapur, José Israel Orellana García, and David Héctor Tello Salazar. Medición de esfuerzos y deformaciones en barras metálicas utilizando galgas extensométricas. *Escuela Superior Politecnica del Litoral*, 2, 2012.

[7] Egor P Popov, Toader A Balan, JAVIER LEON CARDENAS, REV TEC, JOSE DE LA CERA ALONSO, et al. *Mecánica de sólidos*. Pearson Educación,, 2000.

[8] Ferd Beer, Russ Johnston, John T DeWolf, and David F Mazurek. *Mecánica de materiales (6a.* McGraw Hill Mexico, 2013.

[9] William D Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, volume 1. Reverté, 1995.

[10] Ferdinand Pierre Beer, E Russell Johnston, John T DeWolf, and David F Mazurek. Mecánica de materiales. Technical report, Mc Graw Hill, 2010.

[11] Richard G Budynas and J Keith Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, volume 6. McGraw-Hill Interamericana, 2012.

[12] Miguel E González, Francisco Vázquez, and Fernando Morilla. Control multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(4):53–64, 2010.

[13] Raúl Garduño Ramírez, Arnulfo Antelmo Rodríguez Martínez, Marino Sánchez Parra, Miguel Ángel Martínez Morales, María Aurora Hernández Cuéllar, Indira Xochiquetzal Alcaide Godínez, Víctor Genaro Re López, and Roberto Hernández González. Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores. *Boletín IIE*, 2012.

[14] ABB. Cuarderno de aplicaciones técnicas no. 12 plantas eólicas. 2012.

[15] Carolina Espitia Caita. Diseño y construcción de un miniaerogenerador de eje vertical. *Universidad Militar de Nueva Granada.*, 2014.

[16] Rafael Medina Noguerón. *Cálculo y Diseño de la Pala (Ehecamani) de un aerogenerador.* PhD thesis, 2011.

[17] Asier González and Ekaitz Zulueta Guerrero. Estrategias de control de aerogeneradores. In *XVI Congreso de Confiabilidad*, 2014.

[18] Javier Hernández Agriarte. Diseño de un aerogenerador de baja potencia. 2005.

[19] Gerald Mayoral Aníbal Graterol. Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1 kw de potencia. *Universidad Simón Bolívar*, 2006.

[20] Corporation S. Solidworks office premium; conceptos básicos de solidworks: Piezas y ensamblajes. 2006.

[21] Focer. Manual sobre energía renovable eólica. 2002.

[22] La enegía eólica en méxico. *Secretaría de energía*.

[23] OBEKI S.A Generadores de imanes permanentes. Generadores de imanes permanentes (pmg).

[24] Stephen J. Chapman. Máquinas eléctricas. *Mc-Graw-Hill*, 2012.

[25] William F Smith, Montserrat Cruells Cadevall, et al. *Ciencia e ingeniería de materiales*. 2004.

[26] Arina Avdeeva, Inga Shlykova, Maikel Perez, Maria Antonova, and Svetlana Belyaeva. Chemical properties of reinforcing fiberglass in aggressive media. In *MATEC Web of Conferences*, volume 53, page 01004. EDP Sciences, 2016.

[27] Sergio García Diez. Fibras y materiales de refuerzo: Los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas en 3d. *Revista iberoamericana de polímeros*, 12(5), 2011.

[28] ASTM C 1557-03. Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers, 2008.

[29] Stefanie Romhild, Gunnar Bergman, Pablo Comiono, et al. Corrosion resistance of glass fiber materials-a crucial property for reliability and durability of frp structures in aggressive environments. In *CORROSION 2004*. NACE International, 2004.

[30] Daryl L Logan. *A first course in the finite element method*. Cengage Learning, 2011.

[31] Método del elemento finito y autofem®.

[32] Luis Ruben Cárdenas Campos. Construcción y análisis experimental y por elemento finito compuestos fc-fv-fc y fv-fc-fv, para construcción de un cuadróptero de monitoreo de cultivos.

[33] Juan José Delfín Vázquez. Análisis experimental de esfuerzos en materiales compuestos.

[34] John C Halpin and Nicolas J Pagano. Consequences of environmentally induced dilatation in solids. Technical report, AIR FORCE MATERIALS LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH, 1969.

[35] Edwin Jhovany Alzate Rodríguez, Jose William Montes Ocampo, and Carlos Armando Silva Ortega. Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas. *Scientia et technica*, 1(34), 2007.

[36] Mario Acosta-Flores, Eusebio Jiménez-López, and José Alfredo Rodríguez-Ramirez. Modelo para el análisis experimental de esfuerzos intralaminares en materiales compuestos laminados sujetos a carga axial. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 91(2), 2016.

[37] Raquel Gálvez Román. Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador. B.S. thesis, 2005.

[38] José Alfredo Egas Escobar. Diseño y construcción de un cargador automático de baterías de 120 (v)/10 (a). B.S. thesis, QUITO/EPN/2002, 2002.

[39] Jaume Martínez Bertran. Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.

[40] William Hart Hayt, Jack E Kemmerly, and Steven M Durbin. *Análisis de circuitos en ingeniería*. McGraw Hill, 2012.

[41] Matthew Alexander Sadiku. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Mc Graw Hill, 2006.

[42] Robert L Boylestad and Louis Nashelsky. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON educación, 2003.

[43] Muhammad H Rashid. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.

[44] Daniel W Hart, Vuelapluma, and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España, 2001.

[45] Vishay Micro-Measurements. Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature. *1¿¡B+ LR¿1+] gbf] cY*, 11054:35–47, 2010.

[46] Ansel C Ugural and Saul K Fenster. *Advanced strength and applied elasticity*. Pearson education, 2003.

[47] Bruno A Boley and Jerome H Weiner. *Theory of thermal stresses*. Courier Corporation, 2012.