

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“CONTROL DE POTENCIA MPPT Y SVPWM,
APLICADO A UN SISTEMA EÓLICO-SOLAR
AUTÓNOMO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA

**Callao, 2017
PERÚ**

*Justy
F. Oroch!*

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO

MIEMBROS DEL JURADO

Dr.	: FERNANDO JOSÉ OYANGUREN RAMÍREZ	PRESIDENTE
Dr.	: SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMENEZ	SECRETARIO
Dr.	: CIRO ÍTALO TERÁN DIANDERAS	MIEMBRO
Dr.	: MARCELO NEMESIO DAMAS NIÑO	MIEMBRO
Dr.	: JUAN HERBER GRADOS GAMARRA	ASESOR

Nº DE LIBRO : 01

FOLIO : 063

FECHA DE APROBACIÓN : octubre 20, 2017

RESOLUCIÓN DIRECTORAL : 033-2017-UPG-FIEE

DEDICATORIA

Esta Tesis la dedico a mi amada compañera Silvia por ser el motor que mueve mi existencia en el camino del crecimiento personal y académico. A mis pequeños tesoros Thiago y Liam, que amo infinitamente y por quienes mi vida y mi futuro tienen un nuevo horizonte. A mis queridos padres: mi madre Margarita y a quién en vida fue mi padre Nicanor, que me dieron ejemplo de vida, me formaron en la práctica de principios y valores, me enseñaron el camino de la perseverancia para alcanzar las metas propuestas y me inculcaron que el mayor legado para los hijos es la educación.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor de Tesis Dr. Juan Herber Grados Gamarra, por su apoyo y sugerencias en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE GRÁFICOS	15
ÍNDICE DE TABLAS	16
RESUMEN	18
ABSTRACT	19
RESUMO	20
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.1 Identificación del problema	21
1.2 Formulación del problema	22
1.2.1 Problema general.....	22
1.2.2 Problemas específicos.....	22
1.3 Objetivos de la Investigación	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 Justificación.....	23
1.4.1 Justificación legal	23
1.4.2 Justificación económica.....	25
1.4.3 Justificación social.....	28
1.4.4 Justificación tecnológica.....	30
II. MARCO TEÓRICO	35
2.1 Antecedentes del estudio	35
2.2 Marco filosófico	37
2.2.1 Fundamento ontológico	37
2.2.2 Fundamento metodológico	74
2.2.3 Fundamento epistemológico.....	74
2.3 Definiciones de términos básicos.....	88
2.3.1 Glosario de términos básicos ...	88
2.3.2 Abreviaturas utilizadas	90

III. VARIABLES E HIPÓTESIS	92
3.1 Definición de las variables.....	92
3.2 Operacionalización de las variables.....	92
3.3 Hipótesis.....	94
3.3.1 Hipótesis general.....	94
3.3.2 Hipótesis específicas.....	94
 IV. METODOLOGÍA	 95
4.1 Tipo de investigación.....	95
4.2 Diseño de la investigación.....	95
4.2.1 Diseño del subsistema eólico.....	96
4.2.2 Diseño del subsistema solar fotovoltaico.....	152
4.3 Población y muestra	196
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	196
4.5 Procedimientos de recolección de datos.....	197
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	204
 V. RESULTADOS.....	 211
5.1 Resultados de simulación para el sistema original.....	211
5.1.1 Simulación del generador eólico síncrono de Imanes permanentes.....	211
5.1.2 Simulación de la estrategia de Control MPPT para los convertidores DC/DC Buck y Boost.....	212
5.1.3 Simulación de la etapa de conversión AC/DC (rectificador trifásico).....	215
5.1.4 Simulación de la estrategia de Control SVPWM para los convertidores DC/AC (inversor trifásico).....	215
5.2 Resultados del prototipo solar fotovoltaico.....	216
5.2.1 Resultados de simulación de la estrategia de Control MPPT para los convertidores Buck y Boost mediante Matlab-Simulink.....	216

5.2.2	Resultados de simulación de la estrategia de Control SPWM para los convertidores DC/AC (inversores), mediante Matlab-Simulink	216
5.2.3	Resultados en tiempo real de la estrategia de Control SPWM para los convertidores DC/AC (inversores), en código Arduino.....	217
5.2.4	Resultados en tiempo real de la estrategia e Control MPPT Para el convertidor Buck, mediante Arduino.....	218
5.2.5	Resultados en tiempo real de la estrategia de Control PID para el convertidor Boost, mediante Arduino.....	219
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	220
VII.	CONCLUSIONES.....	222
VIII.	RECOMENDACIONES.....	223
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	224
ANEXOS.....		228
•	Anexo A: Matriz de Consistencia	228
•	Anexo B: Determinación del factor de potencia de una turbina eólica.....	229
•	Anexo C: Respuesta V _I y P _V del panel solar SFM90W.....	230
•	Anexo D: Respuesta del arreglo de paneles solares.....	231
•	Anexo E: Programa de modelado del Convertidor Buck.....	232
•	Anexo F: Programa de modelado del Convertidor Boost.....	233
•	Anexo G: Programa MPPT para el convertidor Buck.....	234
•	Anexo H: Programa MPPT para el convertidor Boost.....	235
•	Anexo I: Programa SVPWM para el inversor trifásico.....	236
•	Anexo J: Programa SPWM para el inversor monofásico.....	239
•	Anexo K: Programa de Control MPPT para el Convertidor DC/DC Buck en Arduino.....	241
•	Anexo L: Programa de Control PID para el	

Convertidor DC/DC Boost en Arduino.....	258
• Anexo M: Consentimiento Informado.....	261

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1. DISEÑO DEL MERCADO ELÉCTRICO.....	25
Figura N° 1.2. EVOLUCIÓN DE PRECIOS DE ENERGÍA SOLAR.....	26
Figura N° 1.3. EVOLUCIÓN DE PRECIOS DE ENERGÍA EÓLICA.....	27
Figura N° 2.1. ÁREA “A” BARRIDA POR EL ROTOR DE DIÁMETRO....	42
Figura N° 2.2. COEFICIENTE DE POTENCIA C_p EN UNA TURBINA EÓLICA.....	43
Figura N° 2.3. GRÁFICA DEL COEFICIENTE DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE “a”.....	44
Figura N° 2.4. GRÁFICA DEL FACTOR DE EMPUJE C_T PARA TRES RANGOS DE “a”.....	45
Figura N° 2.5. DETERMINACIÓN DE λ EN FUNCIÓN DE “V”.....	47
Figura N° 2.6. RESULTADO GRÁFICO DE “ λ ” Y “V”.....	48
Figura N° 2.7. RESPUESTA GRÁFICA DEL COEFICIENTE.....	49
Figura N° 2.8. POTENCIAS DE LAS TURBINAS EÓLICAS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DEL ROTOR.....	50
Figura N° 2.9. APLICACIÓN WEB-GIS DEL ATLAS EÓLICO DEL PERÚ.....	53
Figura N° 2.10. APLICACIÓN MICRO-RENOVA PERÚ PARA SISTEMAS AISLADOS.....	54
Figura N° 2.11. COMPONENTES DE UN GENERADOR EÓLICO.....	57
Figura N° 2.12. TRANSFORMACIONES DE ENERGÍA EN UN AEROGENERADOR.....	58
Figura N° 2.13. ESQUEMA DE UNA CELDA DE SILICIO MONOCRISTALINO.....	62
Figura N° 2.14. ASOCIACIÓN SERIE-PARALELO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA FORMAR UN PANEL.....	64
Figura N° 2.15. CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA CELDA FOTOVOLTAICA CON CARGA.....	64
Figura N° 2.16. CIRCUITO ELÉCTRICO DEL PANEL	

	FOTOVOLTAICO CON CARGA.....	66
Figura N° 2.17.	CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL PANEL FOTOVOLTAICO EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA CON CARGA.....	67
Figura N° 2.18.	DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL PANEL FOTOVOLTAICO CON CAPACITOR.....	68
Figura N° 2.19.	COMPONENTES DE UN GENERADOR SOLAR.....	72
Figura N° 2.20.	SISTEMA EÓLICO-SOLAR CON ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS.....	73
Figura N° 2.21.	ESQUEMA DEL PUENTE RECTIFICADOR CONTROLADO.....	76
Figura N° 2.22.	ESQUEMA DEL PUENTE RECTIFICADOR NO CONTROLADO CON SALIDA POR CAPACITOR.....	77
Figura N° 2.23.	INVERSOR DEL LADO DE LA RED.....	77
Figura N° 2.24.	OBTENCIÓN DE LA SEÑAL PWM.....	79
Figura N° 2.25.	GENERACIÓN DE LA SEÑAL SPWM.....	80
Figura N° 2.26.	ILUSTRACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL SPWM.....	81
Figura N° 2.27.	ILUSTRACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL SVPWM.....	82
Figura N° 2.28.	VECTORES EN COORDENADAS $\alpha - \beta$	83
Figura N° 2.29.	DETERMINACIÓN DE U_{out} EN FUNCIÓN DE u_l y u_r	84
Figura N° 2.30.	PANELES SOLARES: MONOCRISTALINO (IZQUIERDA), POLICRISTALINO (DERECHA).....	86
Figura N° 2.31.	PANELES SOLARES DE CAPA FINA.....	87
Figura N° 2.32.	TECNOLOGÍA DE CONCENTRACIÓN CPV.....	88
Figura N° 4.1.	ESQUEMA DEL SISTEMA EÓLICO-SOLAR DE PEQUEÑA POTENCIA.....	95
Figura N° 4.2.	ESQUEMA DE LAS ETAPAS AC/DC/AC DE	

UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE TRANSMISIÓN DIRECTA.....	96
Figura N° 4.3. DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.....	98
Figura N° 4.4. COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA PALA DEL AEROGENERADOR.....	100
Figura N° 4.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES.....	102
Figura N° 4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES EN EL MARCO DE REFERENCIA dq	104
Figura N° 4.7 DIMENSIONES EXTERNAS DEL AEROGENERADOR BORNAY 6000.....	106
Figura N° 4.8. COMPONENTES DEL AEROGENERADOR BORNAY 6000.....	107
Figura N° 4.9. POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO.....	108
Figura N° 4.10. ESQUEMA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO.....	109
Figura N° 4.11. PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO.....	110
Figura N° 4.12. ESQUEMA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO EN SIMULINK.....	111
Figura N° 4.13. RESPUESTA GRÁFICA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO.....	112
Figura N° 4.14. MODELO GENÉRICO DE UN CONVERTIDOR DC/DC BOOST.....	112
Figura N° 4.15. MODELO ESPECÍFICO DE UN CONVERTIDOR DC/DC BOOST.....	113
Figura N° 4.16. CONVERTIDOR BOOST EN MODO	

DE CONDUCCIÓN.....	114
Figura N° 4.17. CONVERTIDOR BOOST EN MODO DE CORTE.....	115
Figura N° 4.18. GRÁFICAS DE TENSIÓN E INTENSIDAD EN LA BOBINA, PARA RÉGIMEN DE CORRIENTE CONTINUA.....	116
Figura N° 4.19. VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL CICLO DE TRABAJO Y DE LA TENSIÓN DE ENTRADA (PERTURBACIÓN).....	119
Figura N° 4.20. VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL CICLO DE TRABAJO.....	120
Figura N° 4.21. VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DEL VOLTAJE DE ENTRADA.....	120
Figura N° 4.22. ALGORITMO MPPT DE CONTROL INDIRECTO.....	121
Figura N° 4.23. ALGORITMO MPPT DE CONTROL DIRECTO.....	122
Figura N° 4.24. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO P&O DE ACUERDO A LA VARIACIÓN DE V_{ref}	124
Figura N° 4.25. CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA IZQUIERDA.....	125
Figura N° 4.26. CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA DERECHA.....	126
Figura N° 4.27. CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA DERECHA, ALEJÁNDONOS.....	127
Figura N° 4.28. CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA IZQUIERDA, ALEJÁNDONOS.....	128
Figura N° 4.29. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL.....	130
Figura N° 4.30. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID.....	131
Figura N° 4.31. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONVERTIDOR DC/DC BOOST EN CONJUNTO CON EL GSIP Y EL PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO	

NO CONTROLADO.....	133
Figura N° 4.32. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID.....	134
Figura N° 4.33. BLOQUE DE CONTROL MPPT.....	135
Figura N° 4.34. RESPUESTA EN POTENCIA, INTENSIDAD Y TENSIÓN DE CONTROL MPPT.....	136
Figura N° 4.35. INVERSOR TRIFÁSICO.....	137
Figura N° 4.36. SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICA.....	138
Figura N° 4.37. SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICA SIN PRESENCIA DE TERCER ARMÓNICO.....	139
Figura N° 4.38. CONTENIDO DE ARMÓNICA DEL SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICAS CON O SIN TERCER ARMÓNICO.....	140
Figura N° 4.39. TENSIÓN ESPACIAL DEL INVERSOR TRIFÁSICO.....	143
Figura N° 4.40. TENSIÓN DE FASE A NEUTRO DEL INVERSOR TRIFÁSICO.....	144
Figura N° 4.41. INVERSOR CON CARGA "DELTA" ACTIVA O PASIVA.....	145
Figura N° 4.42. INVERSOR CON CARGA "Y" ACTIVA O PASIVA.....	146
Figura N° 4.43. INVERSOR DE (a) 2 NIVELES, (b) 3 NIVELES, (c) M NIVELES.....	147
Figura N° 4.44. NÚMERO DE NIVELES Y SU DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	147
Figura N° 4.45. INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO ' DE DOS ETAPAS.....	148
Figura N° 4.46. INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO DE DOS ETAPAS CON FUENTE COMÚN.....	149
Figura N° 4.47. INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO DE DOS ETAPAS CON FUENTE COMÚN EN SIMULINK.....	150
Figura N° 4.48. TENSIÓN EN LOS EXTREMOS DE LA ENTRADA DEL TRANSFORMADOR Y	

	TENSIÓN DE SALIDA (CARGA).....	151
Figura N° 4.49.	TENSIÓN EN LOS EXTREMOS DE LA ENTRADA DEL TRANSFORMADOR Y TENSIÓN DE SALIDA (CARGA).....	152
Figura N° 4.50.	ESQUEMA DE UN ARREGLO DE PANELES SOLARES USANDO CÓDIGO EMBEBIDO.....	153
Figura N° 4.51.	ESQUEMA DE UN CONVERTIDOR DC/DC BUCK.....	154
Figura N° 4.52.	MODOS DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC BUCK (IZQ. ON, DER. OFF).....	156
Figura N° 4.53.	VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UN CICLO DE SERVICIO $U = 0.8257$	157
Figura N° 4.54.	VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UNA TENSIÓN DE ENTRADA V_s Y CICLO DE SERVICIO $U = 0.8257$	157
Figura N° 4.55.	ESQUEMA DE CONTROL PID DEL CONVERTIDOR BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	159
Figura N° 4.56.	VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	160
Figura N° 4.57.	VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	160
Figura N° 4.58.	ESQUEMA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES DEL TIPO LADEO-INCLINACIÓN.....	163
Figura N° 4.59.	FOTOGRAFÍA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES DEL TIPO LADEO-INCLINACIÓN, DE 90 W.....	164
Figura N° 4.60.	CAJA DE CONEXIONES DEL PANEL SOLAR.....	165
Figura N° 4.61.	ESTRUCTURA METÁLICA CONFORMADA POR LOS BASTIDORES Y EL PARANTE DE SOPORTE.....	165
Figura N° 4.62.	DISPOSICIÓN DE LOS BASTIDORES METÁLICOS...	166
Figura N° 4.63.	SIMULACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS	

BASTIDORES EN EL PARANTE DE SOPORTE.....	166
Figura N° 4.64. ACTUADORES LINEALES CON SERVOMOTOR DC Y SIN CAJA REDUCTORA (PRIMERA VERSIÓN).....	167
Figura N° 4.65. INSTALACIÓN DE LOS ACTUADOES LINEALES A LA ESTRUCTURA DE SOPORTE (PRIMERA VERSIÓN).....	167
Figura N° 4.66. SERVOMOTOR DC SIN CAJA REDUCTORA (PRIMERA VERSIÓN).....	168
Figura N° 4.67. MOTOR DC CON CAJA REDUCTORA (SEGUNDA VERSIÓN).....	168
Figura N° 4.68. INSTALACIÓN DEL ENCODER ÓPTICO EN UNA BASE DE ACRÍLICO.....	169
Figura N° 4.69. INSTALACIÓN DEL ACOPLE Y DE LA BOCINA PARA LA CONEXIÓN AL TORNILLO SIN FIN Y A LOS CILINDROS DEL ACTUADOR LINEAL.....	169
Figura N° 4.70. VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE LA FIGURA N° 4.70.....	170
Figura N° 4.71. DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS DE ACERO INOXIDABLE INTERIOR Y EXTERIOR, CONJUNTAMENTE CON LAS CONEXIONES DEL MOTORREDUCTOR, EL TORNILLO SIN FIN Y EL ACOPLE.....	170
Figura N° 4.72. BATERÍA SOLAR CON LOS CABLES DE CONEXIÓN AL CONVERTIDOR DC/DC BUCK.....	171
Figura N° 4.73. COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA, INCLUIDO LOS ACTUADORES LINEALES.....	172
Figura N° 4.74. INSTALACIÓN COMPLETA DE TODO EL SISTEMA DEL GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO.....	173

Figura N° 4.75. VISTA POSTERIOR DE TODO EL SISTEMA DEL GENERADOR SOLAR FOTOLTAICO.....	174
Figura N°4.76. (a) VISTA FRONTAL, (b) VISTA POSTERIOR DEL PANEL FOTOVOLTAICO.....	176
Figura N° 4.77. RESPUESTA V-I DEL PANEL FOTOVOLTAICO SFM 90W.....	176
Figura N° 4.78. PLACA DEL SEGUIDOR SOLAR.....	177
Figura N° 4.79. ESQUEMA EN LAZO CERRADO DEL CONVERTIDOR BUCK.....	178
Figura N° 4.80. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC-DC BUCK.....	180
Figura N° 4.81. ARDUINO NANO V3.0.....	181
Figura N° 4.82. MÓDULO LM2596 (CONVERTIDOR BUCK.....	181
Figura N° 4.83. CONVERTIDOR DC/DC BUCK.....	181
Figura N° 4.84. LECTURA DEL CONVERTIDOR DC/DC BUCK.....	182
Figura N° 4.85. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC-DC BOOST.....	184
Figura N° 4.86. RESULTADOS DE LA COMPILACIÓN Y EJECUCIÓN DEL CONVERTIDOR DC-DC BOOST.....	185
Figura N° 4.87. RESULTADOS DEL CONTROL MPPT DEL CONVERTIDOR DC-DC BOOST.....	185
Figura N° 4.88. TOPOLOGÍA PUENTE COMPLETO DEL INVERSOR MONOFÁSICO.....	186
Figura N° 4.89. ESQUEMA COMPLETO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL INVERSOR MONOFÁSICO PUENTE COMPLETO....	186
Figura N° 4.90. ESQUEMA PARA LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE CONTROL SPWM.....	187
Figura N° 4.91. FORMAS DE ONDA PARA LA MODULACIÓN SPWM UNIPOLAR.....	189
Figura N° 4.92. FILTRO LC PASA BAJO DE SEGUNDO ORDEN.....	191

Figura N° 4.93. TENSION DE SALIDA DEL FILTRO.....	193
Figura N° 4.94. DISTORSION ARMÓNICA TOTAL (DAT) SIN CARGA.....	193
Figura N° 4.95. DISTORSION ARMÓNICA TOTAL (DAT) A PLENA CARGA.....	194
Figura N° 4.96. ESQUEMA DEL CONTROL SPWM DEL INVERSOR MONOFÁSICO.....	194
Figura N° 4.97. RESULTADOS DEL CONTROL SPWM DEL INVERSOR MONOFÁSICO.....	195
Figura N° 4.98. TARJETA DEL INVERSOR MONOFÁSICO.....	195
Figura N° 4.99. LOCALIZACION SATELITAL DE LA ASOCIACION "VIRGEN DE FÁTIMA".....	198
Figura N° 4.100. RELIEVE DEL TERRENO DE LA ASOCIACION "VIRGEN DE FÁTIMA".....	198
Figura N° 4.101. GRÁFICA DE LA VELOCIDAD DE VIENTO.....	199
Figura N° 4.102. ROSA DE VIENTO EN EL PUNTO DE LOCALIZACION GEOGRÁFICA.....	199
Figura N° 4.103. PRONÓSTICO DEL TIEMPO PARA HUACHO.....	202
Figura N° 4.104. MEDIICIONES DE IRRADIACION.....	207
Figura N° 4.105. COMPARACION DE LA ENERGIA OBTENIDA CON PANEL FIJO Y CON PANEL MÓVIL.....	210
Figura N° 4.106. COMPARACION DE LA POTENCIA INSTANTÁNEA OBTENIDA CON PANEL FIJO Y CON PANEL MÓVIL.....	210
Figura N° 5.1. POTENCIA GENERADA POR EL GENERADOR EÓLICO.....	211
Figura N° 5.2. VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UNA TENSION DE ENTRADA V_s Y CICLO DE SERVIVIO $U= 0.8257$, USANDO CONTROL PID.....	212
Figura N° 5.3. VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	213

Figura N° 5.4. VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DEL VOLTAJE DE ENTRADA, USANDO CONTROL PID.....	213
Figura N° 5.5. RESPUESTA GRÁFICA DEL CONTROLADOR PID PARA $U = 0.8$	214
Figura N° 5.6. RESPUESTA EN POTENCIA, INTENSIDAD Y TENSIÓN DE CONTROL MPPT, USANDO MPPT P&O.....	214
Figura N° 5.7. SALIDA DE TENSIÓN Y RIZADO DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO.....	215
Figura N° 5.8. TENSIÓN DE SALIDA DEL INVERSOR.....	216
Figura N° 5.9. TENSIÓN DE SALIDA DEL INVERSOR APLICANDO CONTROL SPWM.....	217
Figura N° 5.10. TENSIÓN DE SALIDA DEL INVERSOR EN TIEMPO REAL APLICANDO CONTROL SPWM.....	218
Figura N° 5.11. LECTURA DEL CONVERTIDOR DC/DC BUCK.....	219

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1.1. EMISIONES DE CO2 GENERADAS POR LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA EN SECUNDARIA Y EL CONSUMO PROPIO.....	32
Gráfico N° 1.2. EMISIONES DE CO2 GENERADAS POR EL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA.....	32
Gráfico N° 1.3. EMISIONES DE CO2 POR SECTORES ECONÓMICOS.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1.	PRECIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES AL 2018.....	27
Tabla N° 1.2.	CATEGORIZACIÓN POR NIVEL SOCIOECONÓMICO.....	29
Tabla N° 2.1.	VALORES TÍPICOS DE RUGOSIDAD DEL TERRENO.....	40
Tabla N° 2.2.	VECTORES EN COORDENADAS $\alpha - \beta$	83
Tabla N° 4.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA BORNAY 6000.....	105
Tabla N° 4.2.	CONTENIDO DE ARMÓNICA DEL SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICAS CON O SIN TERCER ARMÓNICO.....	142
Tabla N° 4.3.	SECUENCIA DE ENCENDIDO PARA EL INVERSOR DE LA DE LA FIGURA N° 4.46.....	149
Tabla N° 4.4.	CONDICIONES PARA MODO CONTINUO DE CONDUCCIÓN (MCC).....	155
Tabla N° 4.5.	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL PANEL SOLAR MONOCRISTALINO SFM 90W DE SINGFO SOLAR ENERGY SCI & TECH CO., LTD.....	175
Tabla N° 4.6.	ALGUNAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	200
Tabla N° 4.7.	ALGUNOS DATOS DE LAS MEDICIONES DE VELOCIDAD DE VIENTO.....	203
Tabla N° 4.8.	PROMEDIOS CLIMÁTICOS DE TEMPERATURAS EXTREMAS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS.....	204
Tabla N° 4.9.	PROMEDIOS DE LA VELOCIDAD DE VIENTO.....	205
Tabla N° 4.10.	DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y VARIANZA DE LA VELOCIDAD DE VIENTO.....	206

Tabla N° 4.11. PROMEDIO DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO A ESCALA (PRIMERA PARTE).....	208
Tabla N° 4.12. PROMEDIO DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO A ESCALA (SEGUNDA PARTE).....	209

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se aborda el estudio del recurso eólico-solar en el Perú, sus características y los beneficios que ella significa como energía limpia, así como la necesidad de aprovecharlas frente a los problemas de contaminación ambiental provocadas por el uso de la energía convencional, acorde con la "Propuesta de Política Energética de Estado Perú 2010-2040".

Si bien es cierto la energía del viento y la energía solar están disponibles, también es cierto que éstas tienen problemas de variabilidad que afecta directamente el funcionamiento de los generadores eólicos y fotovoltaicos; por lo que, necesitan ser controladas, para proveer en su salida energía eléctrica de frecuencia y voltaje estables.

En tal sentido, en el presente trabajo se plantea como objetivo principal el estudio y la aplicación de algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT: Maximum Power Point Tracking) a un sistema de generación eólica-solar autónomo de pequeña potencia, orientada a la distribución de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables a pequeñas poblaciones que no cuentan con el servicio de la red eléctrica, sea en la costa o la sierra, por lo que se ha considerado una potencia de generación eólica y solar de 6 KW cada una, haciendo un total de 12 KW.

Asimismo, es necesario indicar que el algoritmo a emplearse para el control de los inversores es el de Modulación por Ancho de Pulso por Vector Espacial (SVPWM: Space Vector Pulse Width Modulation).

Finalmente, los resultados analíticos y de simulación serán validados con la implementación de un generador solar fotovoltaico con orientación automática de dos ejes, de 90W, en el cual se aplicarán los algoritmos de optimización MPPT y SPWM, contando con Arduino como plataforma de desarrollo.

ABSTRACT

In this thesis, the study of the solar-wind resource in Peru, its characteristics and the benefits that it means as clean energy, as well as the need to take advantage of them, are tackled in the face of the problems of environmental pollution caused by the use of Conventional energy, in accordance with the "Peruvian Energy Policy Proposal 2010-2040".

While it is true that wind energy and solar energy are available, it is also true that these have variability problems that directly affect the operation of wind and photovoltaic generators; therefore, need to be controlled, to provide at their output stable and stable voltage and frequency.

In this sense, the main objective of this work is the study and the application of maximum power point tracking (MPPT) algorithms to an autonomous small wind power generation system, oriented to The distribution of electrical energy from renewable sources to small towns that do not have the service of the electricity network, either on the coast or the mountains, so it has been considered a power generation wind and solar of 6 KW each, Making a total of 12 KW.

In addition, it is necessary to indicate that the algorithm to be used for the control of the inverters is the Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM).

Finally, the analytical and simulation results will be validated with the implementation of a 90W two axis automatic photovoltaic solar generator, in which MPPT and SPWM optimization algorithms will be applied, with Arduino as a development platform.

RESUMO

Nesta tese, o estudo do recurso solar-vento no Peru, suas características e os benefícios que isso significa como energia limpa, bem como a necessidade de aproveitar os problemas de poluição ambiental causados pelo uso da energia convencional, de acordo com a "Proposta de Política de Energia Peruana 2010-2040".

Embora seja verdade que a energia eólica e a energia solar estão disponíveis, também é verdade que estes têm problemas de variabilidade que afetam diretamente a operação de geradores de energia eólica e fotovoltaica; portanto, precisam ser controlados, para fornecer à sua saída uma tensão e uma frequência estáveis e estáveis.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho é o estudo e a aplicação de algoritmos de monitoramento de ponto de potência máxima (MPPT) para um sistema de energia eólica autônomo de pequena potência, orientado para a distribuição de energia elétrica a partir de fontes renováveis para pequenas cidades que não têm o serviço da rede elétrica, tanto na costa quanto nas montanhas, por isso foi considerado uma geração de energia eólica e solar de 6 KW cada, fazendo um total de 12 KW.

Também é necessário indicar que o algoritmo a ser usado para o controle do inversor é Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM).

Finalmente, os resultados analíticos e de simulação serão validados com a implementação de um gerador solar fotovoltaico automático de dois eixos de 90W, no qual os algoritmos de otimização MPPT e SPWM serão aplicados, com o Arduino como plataforma de desenvolvimento.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema

En el presente proyecto de tesis se considera como objeto de estudio el generador eólico-solar, que está compuesto por dos subsistemas: el generador eólico y el generador solar, los cuales necesitan por un lado de energía del viento y por otro lado la energía del sol para poder generar energía eléctrica destinada al consumo de pequeños poblados que no cuentan con el servicio de la red eléctrica.

Si bien es cierto que las energías eólica y solar están disponibles, también es cierto que éstas tienen el problema de su variabilidad, particularmente la energía eólica, debido a que la velocidad y orientación del viento cambia de acuerdo a la geografía, las estaciones y durante el día. En el caso de la energía solar el voltaje generado por los paneles solares es variante, y por consiguiente la corriente; sin embargo su variabilidad no es significativa comparada a la energía eólica. Asimismo, los sistemas fotovoltaicos o solares tienen la ventaja de ser estáticos y de requerir poco mantenimiento y reparaciones; sin embargo, la potencia fotovoltaica es típicamente cinco veces más cara que la potencia eólica. La eficiencia de la conversión de la potencia solar es típicamente de 16% (aunque en los últimos años se están fabricando y comercializando paneles solares de mejores características) y su disponibilidad es también esporádica debido a esto es necesario el desarrollar un sistema híbrido que permita emplear ambas fuentes, siendo necesario controlar a ambos sistemas para obtener energía eléctrica de frecuencia y voltaje regulados, para que su uso sea confiable y eficiente.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, es que se plantea la formulación del problema:

¿De qué manera las técnicas de Control MPPT y SVPWM permitirán optimizar la generación de energía del sistema eólico-solar?

1.2.2 Problemas específicos

Problema específico N° 1

¿Se obtendrá el modelo matemático, el diseño del control MPPT y SVPWM del subsistema eólico de 6 KW y simular su respuesta?

Problema específico N° 2

¿Se obtendrá el modelo matemático, el diseño del control MPPT y SVPWM del subsistema solar fotovoltaico de 6 KW y simular su respuesta?

Problema específico N° 3

¿Se implementará un generador solar fotovoltaico a escala reducida con orientación automática de dos ejes, de 90W, en el cual se implementarán los algoritmos de Control MPPT y SPWM, usando Arduino como plataforma de desarrollo, y mostrar sus resultados?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto de tesis es determinar en qué medida la aplicación de técnicas de control indicadas permiten optimizar la generación de energía del sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

Objetivo Especifico N° 1

Obtener el modelo matemático, diseñar el Control MPPT y SVPWM del subsistema eólico de 6 KW y simular su respuesta.

Objetivo Específico N° 2

Obtener el modelo matemático, diseñar el Control MPPT y SVPWM del subsistema solar fotovoltaico de 6 KW y simular su respuesta.

Objetivo Específico N° 3

Implementar un generador solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes, de 90W, en el cual se implementarán los algoritmos de Control MPPT y SVPWM, usando Arduino como plataforma de desarrollo, y mostrar sus resultados

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación Legal

El marco regulatorio del sector eléctrico en el Perú está sustentada en diferentes dispositivos legales, entre los cuales podemos citar:

- ✓ Ley N° 25844: "Ley de Concesiones Eléctricas (LCE)"
- ✓ D.S. N° 009-93-EM: "Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas (RLCE)"
- ✓ Ley N° 28832: "Ley para asegurar el desarrollo eficiente de la generación eléctrica"
- ✓ D.L. N° 1002: "Promoción de la inversión para la generación de la electricidad con el uso de energías renovables"
- ✓ D.L. N° 1041: "Modificatoria de diversas normas del marco normativo eléctrico"
- ✓ D.L. N° 1058: "Promoción de la inversión en la actividad de generación eléctrica con recursos hídricos y otros recursos renovables"
- ✓ Decreto Supremo N° 064-2010-EM: "Propuesta de Política Energética de Estado 2010-2040", publicado en el diario oficial El

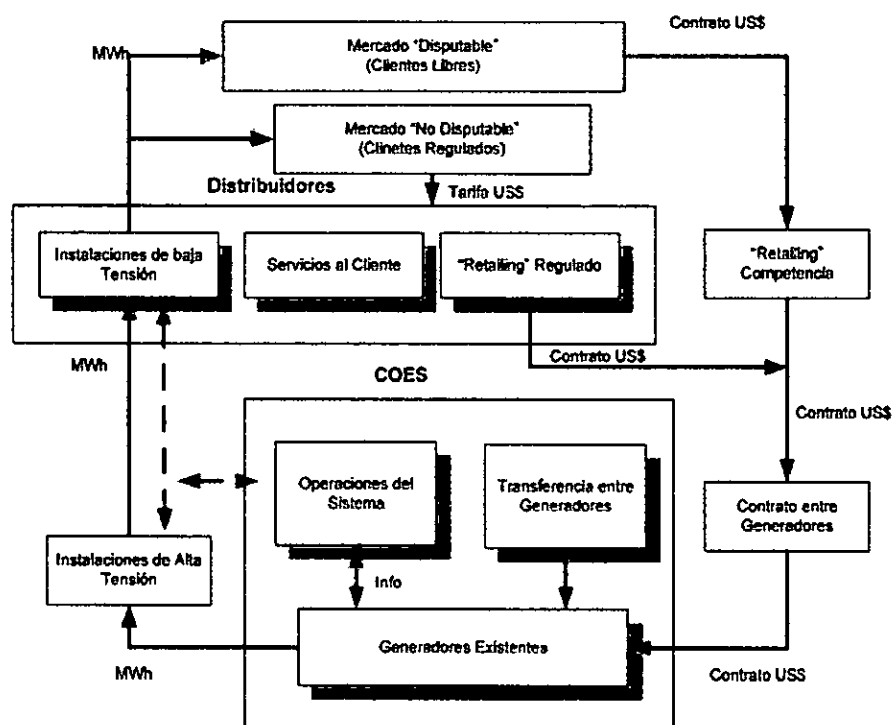
Peruano de fecha 24 de Noviembre del 2010 [23], establece entre otros los lineamientos de política energética, y en su Visión plantea “Un sistema energético que satisface la demanda nacional de energía de manera confiable, regular, continua y eficiente, que promueve el desarrollo sostenible y se soporta en la planificación y en la investigación e innovación tecnológica continúa.”

De acuerdo a la Comisión MEM-OSINERG, cuya propuesta de Proyecto de Ley para asegurar el “Desarrollo Eficiente de la Generación Eléctrica, presenta la segmentación de dos tipos de clientes en función de su demanda por capacidad, siendo clientes regulados todos aquellos con consumos menores a 1 MW de demanda de potencia (Servicio Público de Electricidad), y clientes libres aquellos cuya demanda es mayor o igual a 1 MW (aproximadamente el 47% del volumen de ventas), según puede observarse en la Figura N° 1.1.

Las reformas y modificaciones integrales a los marcos regulatorios requieren de un estudio profundo que debe llevarse a cabo por especialistas en la materia sectorial.

Si bien la base de todo marco regulatorio tiene un alto contenido jurídico, es necesario señalar que su temática hace imprescindible el trabajo interdisciplinario de especialistas en derecho, economía e ingeniería; cada uno de ellos a su vez especializados en las variadas ramas de sus respectivas profesiones.

Figura N° 1.1
DISEÑO DEL MERCADO ELÉCTRICO



Fuente: Comisión MEM-OSINERG

En general, la adecuación de marcos regulatorios implica un desafío mayor que la elaboración de uno nuevo, ya que a una industria que se encuentra con cierto grado de desarrollo puede serle traumática la adecuación a nuevas reglas de juego. Por ello es que su adecuación requiere de estudios pormenorizados, así como de talleres en los que se presenten las modificaciones a los actores del sector para recoger sus experiencias y comentarios, etc.

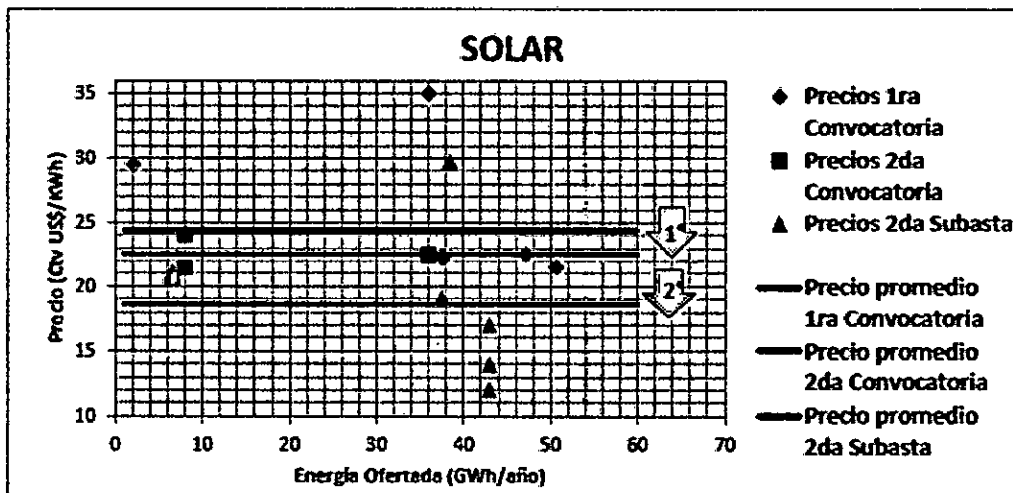
1.4.2 Justificación económica

Si bien es cierto que la instalación de generadores eólicos es costosa; sin embargo su mantenimiento es cómodo, y el retorno de la inversión es seguro.

Según el informe sobre "Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Perú" [16], la evolución de precios de la primera y segunda subasta de energías renovables, la tendencia es a su reducción, con lo cual se presenta un panorama prometedor, tal como puede apreciarse en la Figura N° 1.2 y Figura N° 1.3.

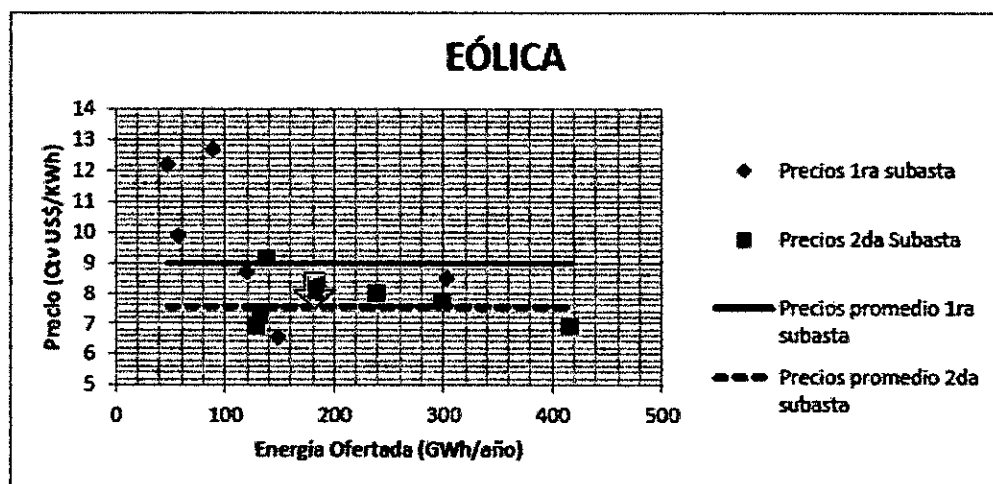
Por otro lado, la cuarta subasta empezó en setiembre de 2015 con la convocatoria a nivel nacional e internacional y el registro de participantes. Los 13 proyectos ganadores cubrieron el 99.38 por ciento de la energía solicitada y sus precios fueron inferiores a los máximos establecidos por el organismo regulador.

Figura N° 1.2
EVOLUCIÓN DE PRECIOS DE ENERGÍA SOLAR



Fuente: Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Perú [16]

Figura N° 1.3
EVOLUCIÓN DE PRECIOS DE ENERGÍA EÓLICA



Fuente: Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Perú [16]

Osinermin resaltó que los precios adjudicados de los proyectos eólicos y solares fotovoltaicos son los más bajos de los últimos años a nivel latinoamericano (ver Tabla N° 1.1).

Tabla N° 1.1
PRECIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES AL 2018

Tecnología	N° de Proyectos Adjudicados	Potencia Total (MW)	Energía Total Adjudicada (GWh/año)	Precio Promedio de Adjudicación (USD/MWh)
Biomasa Residuos Sólidos Urbanos Biogás	2	4,0	29,0	77,00
Eólica	3	162,0	738,6	37,79
Solar Fotovoltaica	2	184,5	523,4	48,09
Hidroeléctrica	6	79,7	448,2	43,86

Fuente: Osinermin

Los proyectos ganadores de la cuarta subasta estarán ubicados en los departamentos de Áncash, Cajamarca, Ica, Lima, Moquegua y San Martín. La fecha referencial de puesta en operación comercial es diciembre de 2018.

En energía solar, el Perú pasó de USD 221 en 2010 a USD 48.09 x MW/h (el atlas solar indica que los niveles más altos de radiación solar se dan en el sur del país: 6,0-6,5 kWh/m²), mientras que en energía eólica, el Perú tiene el mayor potencial en sus costas (el atlas eólico estima un potencial sobre los 77 000 MW, de los cuales se pueden aprovechar más de 22 000 MW).

A todo esto se puede agregar el beneficio de reducir las emisiones de CO₂, debido a utilizar energías limpias.

1.4.3 Justificación social

La crisis energética mundial no es otra cosa que la relacionada al agotamiento de las reservas de energías fósiles; y esto trae consigo el encarecimiento y por consiguiente el alza del precio del combustible.

Los más afectados por esta crisis son los sectores populares, particularmente los sectores de los niveles: **marginal y bajo inferior**, que tienen que soportar los efectos que esto trae consigo, es decir el alza del costo de vida, particularmente el de los servicios básicos.

De acuerdo al estudio realizado por diversas entidades como APOYO, DATUM, CPI, IMASEN, y otras organizaciones conformantes de Empresas APEIM, la categorización por niveles económicos sería la mostrada en la tabla N° 1.2.

Actualmente la tecnología de sistemas de generación eléctrica usando energías renovables se encuentra en pleno desarrollo y nuestra región e institución no puede quedar ajena a esta tecnología. En nuestro País existen zonas rurales donde la energía eléctrica que se distribuye no es suficiente o bien no llega a poblados aislados, y en algunos otros casos como el de pozos para riego necesitan esta energía la cual es muy costosa de instalar pues es necesario transportarla por medio de cables y las zonas donde deben pasar son muy restringidas.

Tabla N° 1.2
CATEGORIZACIÓN POR NIVEL SOCIOECONÓMICO

APEIM			
Categorización por Nivel Socioeconómico			
Construcción de la Variable		Instrucción + Ocupación + Comodidades + Materiales + Salud	
Nivel 1	E	Marginal	18.0%
Nivel 2	D	Bajo Inferior	32.3%
Nivel 3	C	Bajo Superior	31.7%
Nivel 4	B	Medio	14.6%
Nivel 5	A	Alto	3.4%

Fuente: APEIM

El integrar a mayores sectores sociales, particularmente a sectores muy alejados de sistemas de generación eléctrica convencional, y más específicamente a sectores de extrema pobreza, a los cuales la modernidad y sus beneficios no llegan, es una necesidad que el gobierno debe atender, y evitar así se incremente el número de conflictos sociales en el Perú.

El presidente electo del Perú, Pedro Pablo Kuczynski, al asumir el poder el 28 de julio del 2016, heredó 212 conflictos sociales, en su mayoría ambientales, vinculados a la minería y los hidrocarburos. Según la Defensoría del Pueblo, un 72% de los conflictos al cierre de junio del 2016 se encontraban activos y un 28% estaban latentes.

1.4.4 Justificación tecnológica

En la actualidad, cuando la disponibilidad de recursos fósiles juega un rol determinante en el suministro energético global y nacional, y cuando los factores medio ambientales aparecen entre las preocupaciones principales de la sociedad contemporánea, las tecnologías de las Energías Renovables resurgen con éxito creciente en todas las latitudes del planeta, alentadas por los apremios del suministro energético y la presencia de marcos normativos favorables.

En este contexto, la “Propuesta de Política Energética de Estado Perú 2010-2040” (fuente: Ministerio de Energía y Minas, del 31 de Mayo del 2010), contiene 9 objetivos y 9 lineamientos, que hace referencia específica a las energías renovables y su desarrollo sostenible. Esos objetivos de política de Estado son:

1. Contar con una matriz energética diversificada, competitiva y con énfasis en las fuentes renovables y la eficiencia energética
2. Contar con un abastecimiento energético en un marco de Desarrollo Sostenible
3. Gozar de acceso universal al suministro energético
4. Contar con la mayor eficiencia en la cadena productiva y de uso de la energía, que incluya la aplicación productiva intensiva.
5. Ser autosuficientes en la producción de energéticos.
6. Contar con un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono.

7. Tener una industria del gas natural desarrollada y empleada en actividades de transporte, comercio e industria así como la generación eléctrica eficiente.
8. Lograr el Fortalecimiento de la institucionalidad del sector energético.
9. Estar integrado con los mercados energéticos de países de la región, en los casos que sean favorables para el logro de la visión de largo plazo.

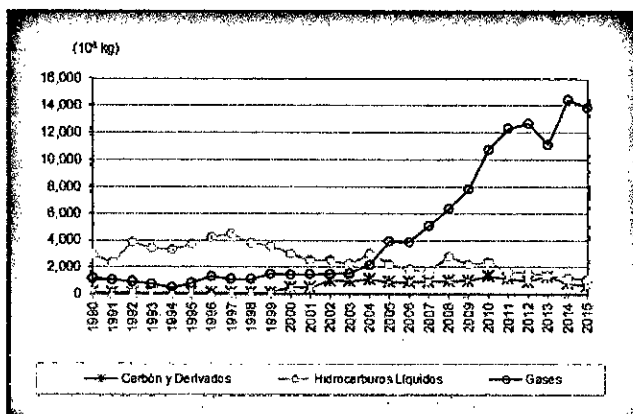
Los factores de contaminación ambiental de la tecnología de combustibles fósiles o gases de Efecto Invernadero como son el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y partículas, son los que generan un fuerte impacto ambiental, produciendo cambios climáticos importantes en diversas partes del mundo, y particularmente las sufridas por el Perú recientemente con las ocurrencias de huaycos, particularmente en la costa.

Concordante con el objetivo 6 de la política del Estado Peruano, el Ministerio de Energía y Minas muestra su preocupación respecto a la emisión de contaminantes como el CO_2 , según se puede observar del “Balance Nacional de Energía 2015”, en el periodo 1990 – 2015 [24], que indica que las emisiones de dióxido de carbono, provenientes de la transformación de energía primaria en secundaria y consumo propio, se incrementaron hasta alcanzar 15,3 mil millones de kilogramos en el año 2015. Puede notarse que a partir del 2004, se incrementa sostenidamente las emisiones en transformación y consumo propio principalmente, debido al incremento de la generación eléctrica a partir del gas natural. Este incremento pronunciado en la participación del gas en la transformación no se refleja en la misma magnitud en los consumos finales de energía, en los cuales predominan los hidrocarburos líquidos, tal como puede apreciarse en el Gráfico N° 1.1 y el Gráfico N° 1.2.

La misma fuente muestra el incremento de las emisiones de CO₂ por sectores económicos, tal como se puede apreciar en el Gráfico N° 1.3, y del que se puede concluir que el sector mayor contaminante es el transporte, seguido del sector industrial.

Gráfico N° 1.1

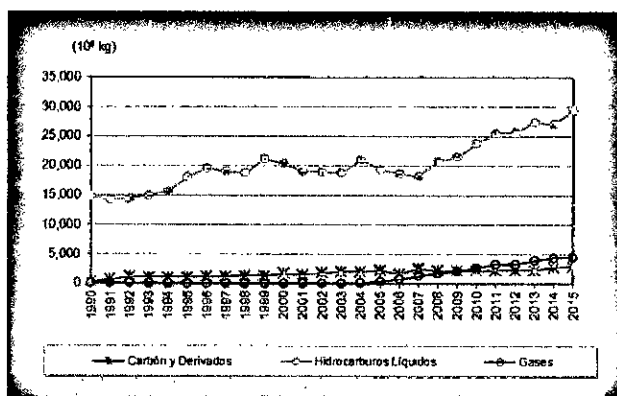
EMISIONES DE CO₂ GENERADAS POR LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA EN SECUNDARIA Y EL CONSUMO PROPIO



Fuente: Balance Nacional de Energía 2015-MINEM

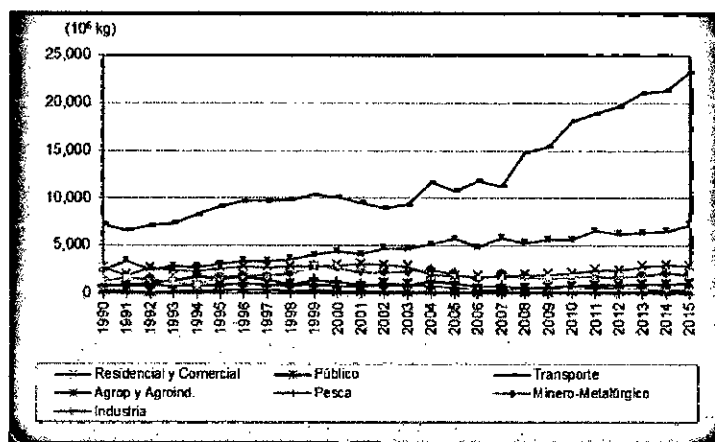
Gráfico N° 1.2

EMISIONES DE CO₂ GENERADAS POR EL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA



Fuente: Balance Nacional de Energía 2015-MINEM

Gráfico N° 1.3
EMISIONES DE CO₂ POR SECTORES ECONÓMICOS



Fuente: Balance Nacional de Energía 2015-MINEM

En tal sentido, las tecnologías de energías renovables son una solución para mitigar el problema del cambio climático y el efecto invernadero. Es tal la importancia de incursionar seriamente en la generación eléctrica a partir de energías renovables, como energía limpia (no contaminante), que el Estado Peruano, tiene bajo su agenda el ser el promotor para la inversión en proyectos de generación eólico-solar entre otros.

El proceso de subastas convocadas por OSINERGMIN para el suministro de energía es el siguiente:

1. Osinergmin ha realizado cuatro subastas para el suministro de energía eléctrica producida con fuentes renovables.
2. El organismo regulador recibe el encargo del Ministerio de Energía y Minas, el cual se basa en el pronóstico de demanda de los próximos cinco años. La primera subasta se realizó en el 2010.

3. Producto de las subastas de Osinergmin, se ha iniciado la construcción de parques eólicos y solares.
4. La Cámara de Comercio de Lima estima inversiones en nuevas fuentes de agua y tecnología ecoeficiente para la próxima década por US\$5.000 millones en el Perú.

En este contexto es que, el presente proyecto de tesis se enfoca en aportar una solución por medio de la generación eléctrica a partir de estas fuentes renovables de energía y su posterior control para hacerlas más eficientes y así poder ser utilizada en poblados que se encuentran alejados de la ciudad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio

Las fuentes de energía explotadas en el mundo son fundamentalmente no renovables y su generación se realiza en su mayoría a través de procesos contaminantes. Por ello, las principales medidas ambientales concernientes al sector energético se han centrado en dos ámbitos: el fomento de prácticas encaminadas a lograr el mayor grado de ahorro y de eficiencia energética, y el apoyo a la generación de energía mediante fuentes alternativas menos alteradoras del entorno (eólica, solar, mareomotriz, etc.).

Los diversos acontecimientos en el planeta, tales como el calentamiento global, la contaminación, escasez de recursos no renovables, la gran demanda energética de los últimos años, o simplemente aquellos lugares que no poseen suministro eléctrico, ya sean por razones geográficas o por elevados costos de instalación, motivan por la búsqueda de alternativas energéticas limpias y eficientes, tales como la energía eólica, bio-combustibles, y energía solar.

Particularmente, el desarrollo científico basado en el análisis del comportamiento de la energía eólica y solar, y el desarrollo de herramientas de diseño a nivel de software, han facilitado diseños y desarrollos modernos de las energías renovables; sin embargo, en países en desarrollo como el nuestro, todavía no ha logrado el interés de los gobiernos para apostar por el desarrollo de energías renovables. Particularmente en el Perú, pareciera que con la nueva política energética planteada se abre el camino a su

promoción como fuente de energía alterna a la convencional por las ventajas que significa tener una energía limpia (no contaminante).

En el Perú, se han realizado esfuerzos orientados al fomento y desarrollo de proyectos en energía renovable, particularmente en eólica y solar, los cuales se pasan a mencionar:

Generadores eólicos (aerogeneradores)

- Esfuerzos aislados de desarrollo tecnológico de pequeñas potencias (ITINITEC a inicio de los 80's, U Católica y UNI fines de los 80's comienzos de los 90's)
- Instalación de un sistema de 3 máquinas de 5kW en Yasile, Piura (fallaron al corto tiempo)
- PAE instaló varias unidades en los 90's (1kW), con poco éxito
- MEM instaló un modelo de 250kW en Chicama y otro de 450kW en Marcona, instaladas por el MEM para la RED, 90's
- La Central Eólica de Malabrigo (Provincia de Ascope, La Libertad), empezó a funcionar en 1996, con una turbina de 250 kW.
- El Parque eólico de San Juan de Marcona, en el año 1999 se puso en funcionamiento una turbina eólica de 450 kW.
- La Central Eólica de Cupisnique (Pacasmayo, La Libertad), en el año 2014, se han puesto en servicio 45 turbinas eólicas de 1800 kW cada una, haciendo un total de 81000 kW.
- La Central Eólica de Marcona (Ica), en el año 2014 se han puesto en funcionamiento 8 turbinas eólicas de 3000 kW cada una, haciendo un total de 24000 kW.
- La Central Eólica de Talara (Piura), en el año 2014 se han puesto en funcionamiento 17 turbinas eólicas de 1800 kW cada una, haciendo un total de 30600 kW.
- Actualmente, en el Parque eólico Tres Hermanas se está construyendo 8 turbinas eólicas que generarán 18400 kW.

Generadores Fotovoltaicos

Según OSINERGMIM [2], [6], se llevaron a cabo 4 subastas hasta el 2016, según se indican:

- En la primera subasta del 2010, se adjudicaron 4 plantas solares de 80MW (Tacna Solar), que entraron en funcionamiento el 2012.
- En la segunda subasta del 2011, se adjudicó 1 planta solar de 16MW (Moquegua FV), que entró en operación el 2014.
- En la cuarta subasta iniciada el 2015, se adjudicaron 2 plantas solares de un total de 184.5 MW, siendo la fecha referencial de puesta en operación comercial, diciembre del 2018.

2.2 Marco Filosófico

2.2.1 Fundamento Ontológico

❖ Energía Eólica

✓ Comportamiento del Recurso Eólico

La atmósfera constituida esencialmente por oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, se caracteriza por su presión, que varía con la altura.

La radiación solar se absorbe de manera diferente en los polos que en el ecuador, a causa de la redondez de la tierra. La energía absorbida en el ecuador es mayor que la absorbida en los polos. Estas variaciones de temperatura, provocan cambios en la densidad de las masas de aire, lo cual hace que se desplacen en diferentes latitudes. Estas traslaciones se realizan desde las zonas en que la densidad del aire (presión atmosférica) es alta en dirección hacia las de baja presión atmosférica.

Se establece así, cierto equilibrio por transferencia de energía hacia las zonas de temperaturas extremas, sin lo cual serían inhabitables. Existen otros desplazamientos que se ejercen

perpendicularmente a la dirección del movimiento de las masas de aire, hacia la derecha en el hemisferio norte, y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

Sin embargo, estas direcciones, están frecuentemente perturbadas por:

1. Las tormentas que desvían la dirección dominante, como se hace patente en registros.
2. Los obstáculos naturales, bosques, cañadas, depresiones, etc. Estos obstáculos modifican la circulación de las masas de aire en dirección y velocidad.
3. Las depresiones ciclónicas que pueden desplazarse en cualquier dirección, pero de hecho, tienen ciertas direcciones establecidas, superponiéndose, al sistema general de presión atmosférica.

El viento se caracteriza, por dos grandes variables respecto al tiempo: la **velocidad** y la **dirección**. La velocidad incide más directamente que la dirección en el rendimiento de la estación.

Los Fenómenos instantáneos (Ráfagas) son difíciles de caracterizar; para tener una idea aproximada de estas variaciones, son necesarios registros meteorológicos de vientos periódicos, de aproximadamente 20 años atrás. Los cambios diarios se deben a los fenómenos térmicos producidos por la radiación solar. Las variaciones de temperatura con la altitud crean corrientes ascendentes.

Los fenómenos o variaciones mensuales dependen esencialmente del lugar geográfico y sólo las estadísticas meteorológicas pueden predecir estas variaciones.

Los fenómenos o variaciones anuales son periódicos con buena precisión en los datos, de modo que de un año a otro, es posible hacer una buena evaluación de la energía eólica recuperable en un lugar determinado.

Debido a su simplicidad, la ley potencial es el modelo más comúnmente usado para describir las variaciones en elevaciones sobre el suelo, que puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

donde $V_1 < V_2$ representan las velocidades del viento a las alturas $h_1 < h_2$, respectivamente, siendo h_2 la altura en metros a la que queremos calcular la velocidad V_2 , y h_1 es la altura a la cual conocemos la velocidad V_1 .

El exponente α caracteriza al rozamiento superficial del terreno, pudiendo variar entre 0,08 (sobre superficies lisas como hielo, lagunas, etc.) y 0.40 (sobre terrenos muy accidentados). Dicho exponente, puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \left(\frac{15.25}{z_0} \right)} \quad (2.2)$$

Donde z_0 es la rugosidad del terreno.

En la Tabla N° 2.1 se presentan valores típicos de rugosidad para diferentes tipos de terreno.

Tabla N° 2.1
VALORES TÍPICOS DE RUGOSIDAD DEL TERRENO

Tipo de terreno	Rugosidad (m)
Hielo	10^{-5} a 3×10^{-5}
Agua	10^{-4} a 3×10^{-4}
Hierba cortada	10^{-3} a 10^{-2}
Hierba alta	10^{-2} a 4×10^{-2}
Terrenos rocosos	10^{-2} a 5×10^{-2}
Pastos	0.1 a 0.3
Suburbios	0.5 a 1
Bosques	0.1 a 1
Ciudades	1 a 5

Fuente: elaboración propia

Bajo atmósfera neutra y homogénea horizontalmente, sobre terreno horizontal, se cumple la ecuación:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{\ln(h_2 / z_0)}{\ln(h_1 / z_0)} \right) \quad (2.3)$$

La energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

$$E_c = M \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

E_c = energía cinética [joule/s]

M = flujo de aire [kg/s]

$V_1 - V_2 = V$ = velocidad del viento [m/s]

La energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área de captación (A) para un cierto valor de la velocidad del viento incidente que podremos extraer de una masa de aire en movimiento, viene a ser la potencia máxima extraíble dada por:

$$P_{\text{maxext}} = P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.5)$$

siendo:

ρ : densidad del aire [kg/m³]

A : área de captación [m²]

Siendo el área A igual a:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.6)$$

La potencia máxima extraíble o disponible en el rotor de la turbina eólica viene dada por:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) V^3 = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3 \quad (2.7)$$

A esta energía se la denomina potencia meteorológica o potencia eólica disponible, y viene expresada en W/m².

Como la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula, la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima energía recuperable, con un aerogenerador ideal, es igual a 16/27 (59,26%) de la energía contenida en el viento es aprovechable como energía disponible en el eje de la aeroturbina, a este valor se le da el nombre de coeficiente de potencia C_p . En la actualidad las aeroturbinas más eficientes alcanzan valores de rendimiento energético del 50% [17].

Por lo que la ecuación (2.7) debe de tomar en cuenta esta ley de Betz con lo cual la potencia máxima real extraída por una aeroturbina está dada por la ecuación siguiente:

$$P_{\text{maxextraída}} = P = \frac{8}{27} \rho A V^3 = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) \quad (2.8)$$

Por consiguiente, introduciendo en la fórmula el límite de Betz (C_p), tendremos que:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) \quad (2.9)$$

Entonces, el límite de Betz será:

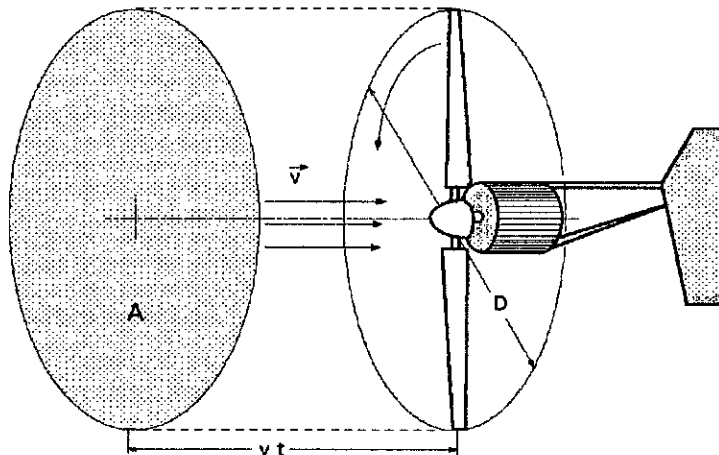
$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{2P_{\text{max}}}{\rho A V^3} \quad (2.10)$$

Por lo que el área de captación de las aspas del generador será:

$$A = \frac{2P_{\text{max}}}{\rho C_p V^3} = \frac{2P_{\text{max}}}{\rho (16/27) V^3} \quad (2.11)$$

En la Figura N° 2.1 se puede apreciar el área A barrida por el rotor de diámetro D .

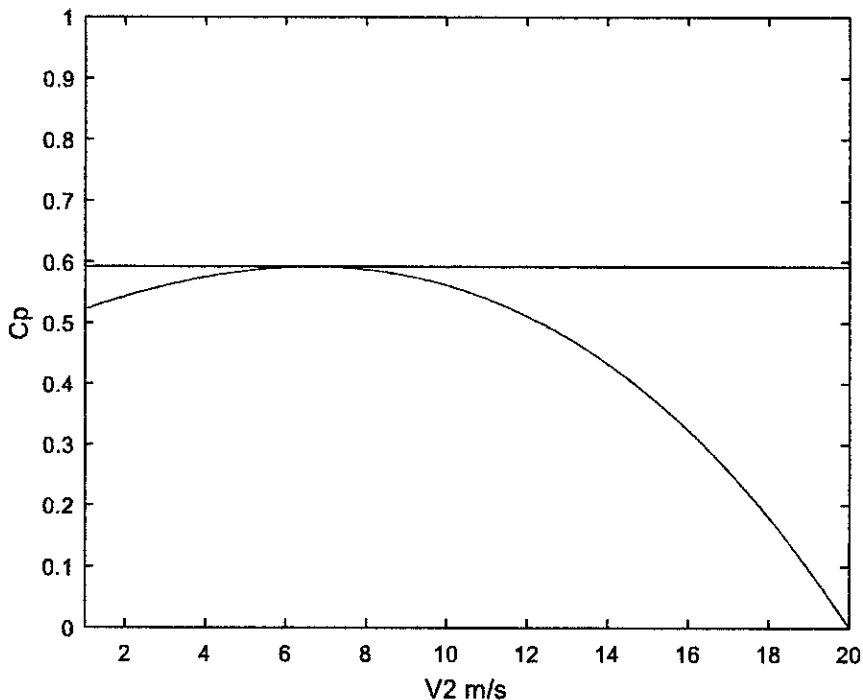
Figura N° 2.1
ÁREA "A" BARRIDA POR EL ROTOR DE DIÁMETRO "D"



Fuente: Energía Eólica [14]

A modo de ejercicio, considerando una velocidad de viento de 20m/s, un diámetro del rotor de 4m. y una densidad de 1, se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura N° 2.2, en la que puede apreciar que el coeficiente de potencia C_p es $16/27=0.593$ (59.3%), también denominada límite de Betz, con lo cual se comprueba la ley de Betz, de que solo puede convertirse el 59.3% de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica [6].

Figura N° 2.2
COEFICIENTE DE POTENCIA C_p EN UNA TURBINA
EÓLICA



Fuente: elaboración propia

Tomando en cuenta que ningún rotor es ideal, para caracterizarlo es necesario conocer su eficiencia o rendimiento η , el

rendimiento depende del tipo de máquina, de las condiciones de operación. La potencia obtenible por unidad de área de rotor, medida en W/m², puede expresarse entonces como:

$$P = \frac{8}{27} \eta \rho A V^3 = \frac{16}{27} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \eta \rho V^3 \quad (2.12)$$

Siendo D y R el diámetro y radio del rotor, respectivamente, expresado en metros.

De acuerdo a Betz, el coeficiente de potencia se puede escribir también así:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = 4a(1-a^2) \quad (2.13)$$

En la Figura N° 2.3 se puede apreciar la gráfica del coeficiente de potencia en función de "a", denominado factor de inducción axial.

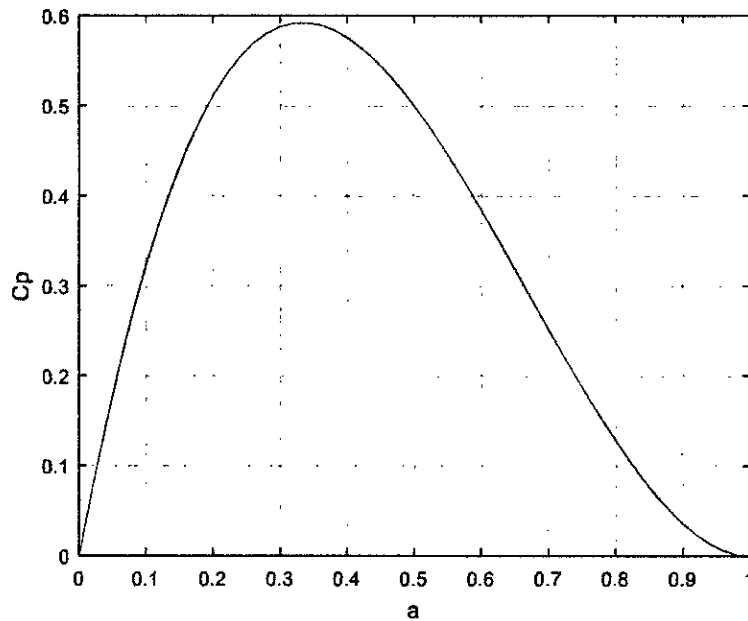
Por consiguiente el coeficiente de empuje C_T viene dada por:

$$C_T = \frac{C_p}{1-a} = 4a(1-a) \quad (2.14)$$

Para obtener el modelo aerodinámico del aerogenerador, consideraremos condiciones ideales, tales como:

- ✓ Estado estacionario del flujo de los fluidos
- ✓ Homogeneidad e incompresibilidad
- ✓ Rozamiento nulo
- ✓ Número infinito de palas
- ✓ Empuje uniforme sobre el rotor
- ✓ Estela sin rotación

Figura N° 2.3
GRÁFICA DEL COEFICIENTE DE POTENCIA
EN FUNCIÓN DE “a”



Fuente: elaboración propia

Para valores de a por encima de 0.4, ocurre un proceso denominado "estado de turbulencia de estela", y para tales situaciones se han encontrado relaciones empíricas entre C_T , a y el factor de pérdidas de punta de Prandtl (f_1), que viene dado por:

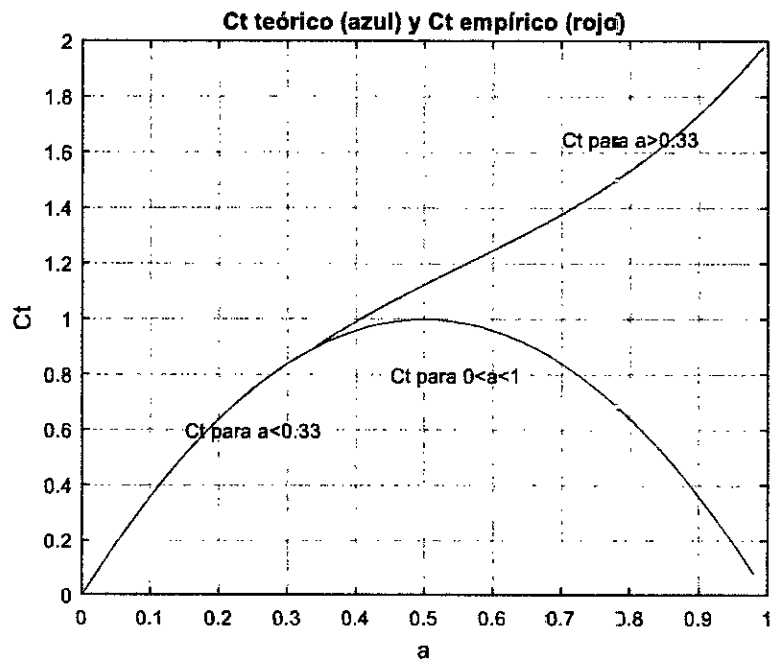
$$\begin{aligned}
 C_T &= 4a(1-a^2)f_1 \quad ; \quad \forall a < 0.33 \\
 C_T &= 4a\left[1 - \frac{1}{4}(5-3a)a\right]f_1 \quad ; \quad \forall a > 0.33
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

En la Figura N° 2.4 se puede apreciar la gráfica de C_T para los casos:

- ✓ $a < 0.33$
- ✓ $a > 0.33$
- ✓ $0 < a < 1$

En todos los casos se ha considerado $f = 1$

Figura N° 2.4
GRÁFICA DEL FACTOR DE EMPUJE C_T PARA
TRES RANGOS DE “a”.



Fuente: elaboración propia

También es común usar una relación de velocidad de punta (tip speed ratio) “ λ ” de la forma:

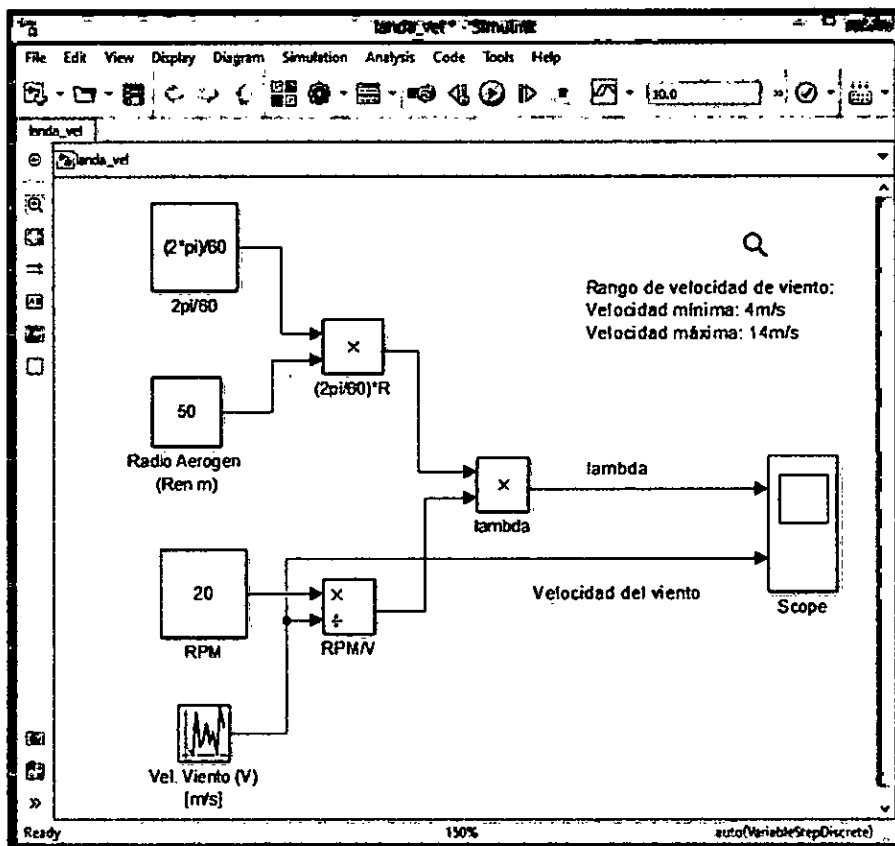
$$\lambda = \frac{\text{Veloc. PuntaPala}}{\text{Veloc. Viento}} = \frac{\omega R}{V} \quad (2.16)$$

donde ω es la velocidad angular del rotor en RPM, R es el radio de la turbina hasta el extremo del rotor (m), V en la velocidad del viento libre (m/s). Frecuentemente la velocidad rotacional de un rotor de turbina de viento está comprendido entre 20 a 50 rpm, y la velocidad del viento está comprendido entre 4 m/s a 14 m/s.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.17)$$

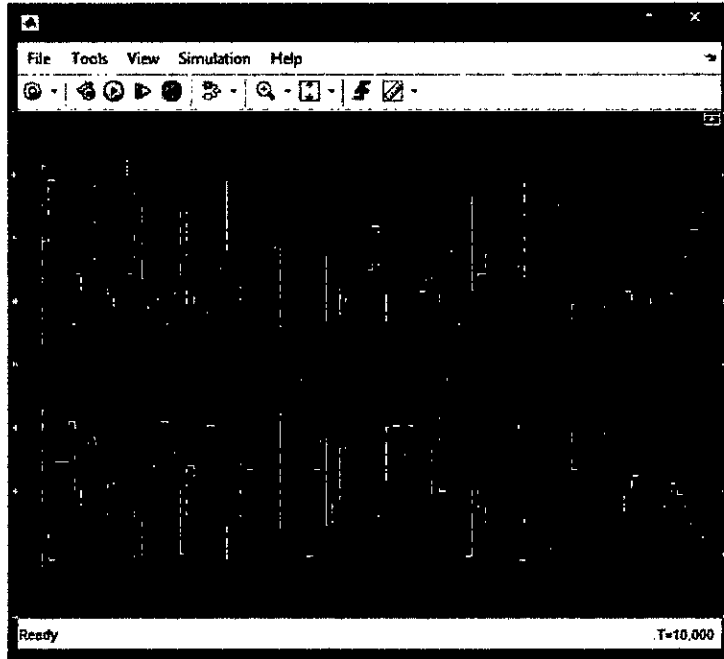
En la Figura N° 2.5 se ha editado un programa en Simulink que permite visualizar λ en función de V, cuyos resultados pueden visualizarse en la Figura N° 2.6.

Figura N° 2.5
DETERMINACIÓN DE λ EN FUNCIÓN DE "V"



Fuente: elaboración propia

Figura N° 2.6
RESULTADO GRÁFICO DE “λ” Y “V”



Fuente: elaboración propia

La potencia máxima en la turbina, que viene a ser la potencia eólica extraída del viento, viene dada por:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.18)$$

Siendo:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\left(\frac{C_5}{\lambda_i} \right)} \quad (2.19)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + C_6 \beta} - \frac{C_7}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (2.20)$$

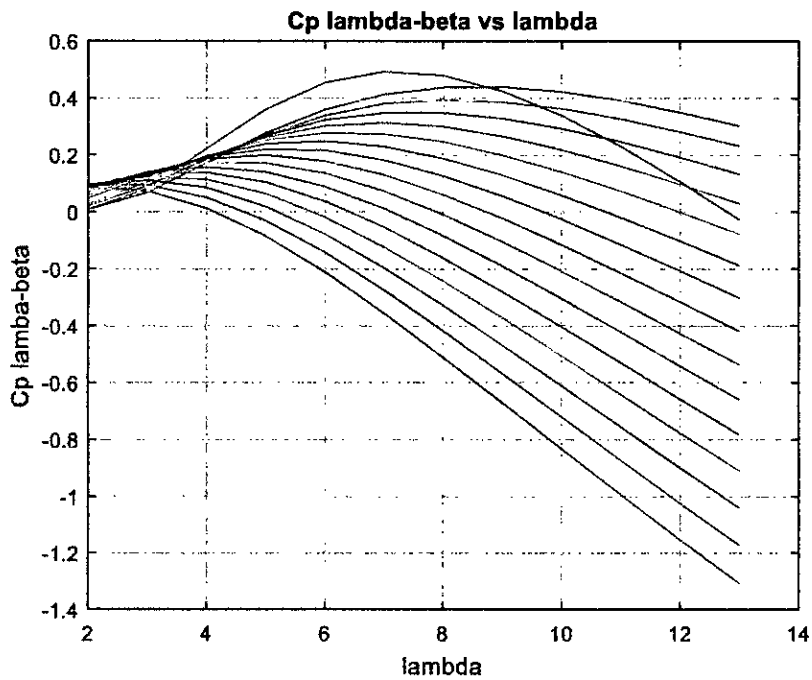
Siendo:

$$C_1 = 0.39; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5;$$

$$C_5 = 16.5; C_6 = 0.089; C_7 = 0.035$$

En la Figura N° 2.7 se puede ver la respuesta gráfica del coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$ en función de λ .

Figura N° 2.7
RESPUESTA GRÁFICA DEL COEFICIENTE DE
POTENCIA VS LAMBDA.



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 2.8 se muestra el nivel de potencias de las turbinas eólicas en función del diámetro del rotor.

Este valor ha de ser compensada por un factor de corrección, puesto que aproximadamente 12,5% de longitud de la lámina del ala

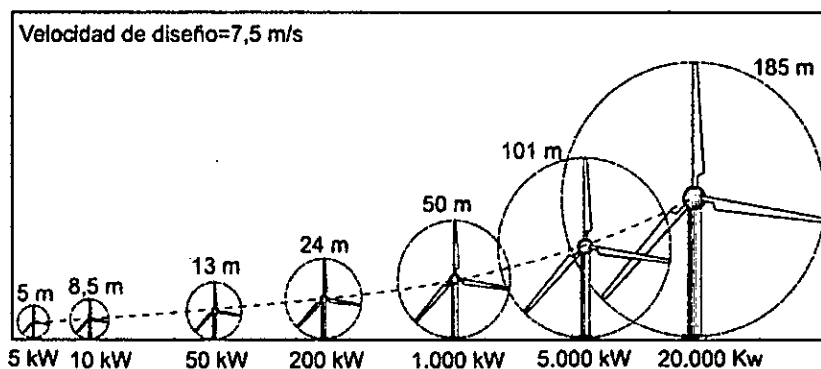
no entra en la producción de energía, formando el núcleo en el centro del aerogenerador que no proporciona ninguna contribución a la generación del par del generador. De la ecuación para el círculo de radio R , se corrige para obtener la longitud de la hoja l_B , así:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi(1-0.125^2)}} \quad (2.21)$$

Por lo que, la longitud de la hoja será:

$$l_B = R.(1-0.125) \quad (2.22)$$

Figura N° 2.8
POTENCIAS DE LAS TURBINAS EÓLICAS EN FUNCIÓN
DEL DIÁMETRO DEL ROTOR



Fuente: Centrales de energías renovables [6]

Distribución de Weibull

La determinación del potencial eólico está relacionado con establecer los parámetros de la ecuación de distribución de Weibull, correspondientes al **parámetro o factor de escala c** (m/s) en m/s que determina la velocidad promedio del viento en el lugar de estudio y el **parámetro o factor de forma k** que indica el grado de dispersión

de los registros, con estos se puede establecer la frecuencia con la que se manifiesta una velocidad determinada del viento, establecida por la ecuación (2.22) y es conocida como la **función de densidad de probabilidad** de la distribución de la velocidad del viento de Weibull.

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.23)$$

Para determinar los parámetros de la ecuación de Weibull, se utiliza el ajuste de mínimos, que corresponde a la ecuación de probabilidad de Weibull, dada por:

$$p_i(v \leq v_i) = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \quad (2.24)$$

Esto se logra utilizando el método de regresión lineal propuesto por Touré, donde relaciona las variables. El proceso se ve reflejado por las ecuaciones siguientes:

$$y_i = \text{Ln}[-\text{Ln}(1 - p_i)] \quad (2.25)$$

$$x_i = \text{Ln}(v_i) \quad (2.26)$$

$$a = -k \text{Ln}(c) \quad (2.27)$$

$$b = k \quad (2.28)$$

El factor de escala c se puede despejar de la ecuación (2.27), así:

$$c = e^{-\frac{a}{k}} \quad (2.29)$$

Aplicando regresión lineal a los datos registrados por una estación eólica, se encuentra la siguiente ecuación lineal:

$$y = k x + a \quad (2.30)$$

El potencial eólico de la zona de estudio, puede calcularse con la ecuación general dada por:

$$\text{Potencial eólico} = \frac{1}{2} \rho v^3 r^2 \pi \quad (2.31)$$

La variación de la densidad en la zona de estudio, viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\rho = 1.225 e^{\left[\left(\frac{-z}{8435} \right) \left(\frac{T-15}{288} \right) \right]} \quad (2.32)$$

siendo z, el valor de la altura en metros sobre el nivel del mar (s.n.m.), y T es la temperatura promedio en °C.

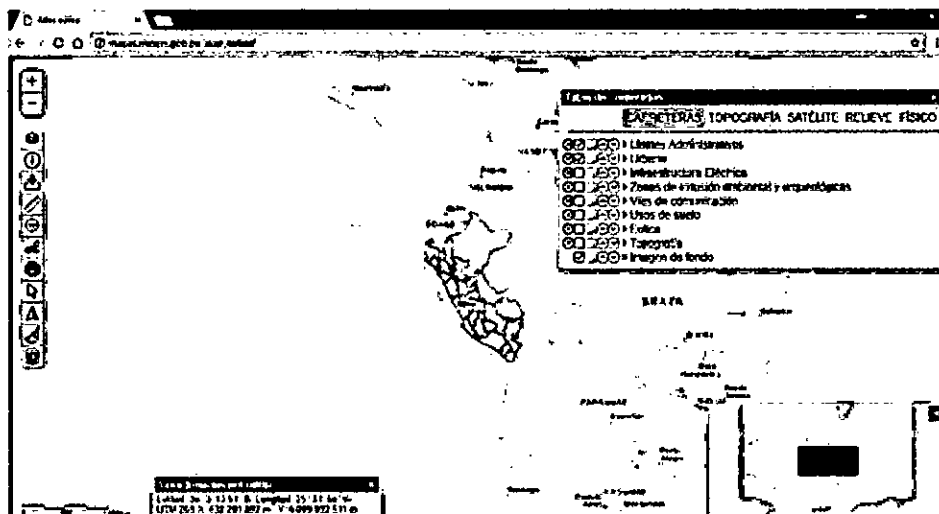
En el año 2008, el MINEM elaboró un estudio preliminar para determinar el potencial eólico a nivel nacional a través del desarrollo de un Atlas Eólico. Dicho estudio se realizó basado en técnicas de modelización meso y micro escalares, combinando la utilización de un modelo de simulación atmosférica para reproducir los patrones de viento a gran escala, a través de un modelo de viento micro escalar que responda a las características del terreno y la topografía [22].

En diciembre del 2016, el MINEM actualizó el Atlas Eólico del 2008, con la finalidad de promover el fortalecimiento de las capacidades del sector, para evaluar el aprovechamiento de la energía eólica con fines energéticos.

Según se puede leer en [22], el principal objetivo del proyecto del Atlas Eólico es realizar una aplicación Web-GIS que muestre las

áreas más favorables para el desarrollo de proyectos eólicos, por tanto, además de contener información sobre el nivel de recurso eólico disponible, contiene información sobre áreas favorables/desfavorables; es decir, se han incorporado otro tipo de capas de información a la herramienta como datos de ubicación del punto seleccionado, altitud, distancias a elementos de interés, rugosidades, información sobre zonas excluyentes y áreas protegidas, etc. En la Figura N° 2.9 se puede apreciar la aplicación Web-Gis del Atlas Eólico del Perú.

Figura N° 2.9
APLICACIÓN WEB-GIS DEL ATLAS EÓLICO DEL PERÚ



Fuente: Atlas Eólico 2016-MINEM

La aplicación permite visualizar en cada punto de interés seleccionado por el usuario final la siguiente información:

- Datos de ubicación (Coordenadas), departamento, provincia, distrito, altitud del terreno, distancia hasta las localidades más cercanas, distancias hasta las líneas y subestaciones de alta

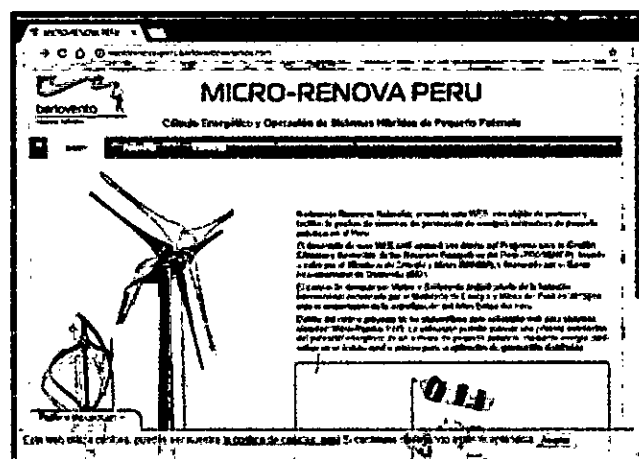
y media tensión más cercanas y longitud de rugosidad de la superficie.

- Datos del recurso eólico: Velocidad del viento, dirección del viento, densidad de potencia, distribución de frecuencias de velocidades (distribución de Weibull), temperatura media, presión media, humedad relativa y densidad del aire.
- Mapas de velocidad y densidad de potencia.
- Extracción de mapas topográficos y de rugosidad de las zonas de interés.
- Producción eólica para un modelo de aerogenerador genérico

Esta aplicación cuenta con un manual de usuario. Asimismo, en aplicaciones de sistemas aislados, Micro-Renova Perú es una aplicación web (<http://microrenova-peru.barloventorecursos.com>) desarrollada por Barlovento Recursos Naturales cuyo objeto es facilitar información del funcionamiento y la operación de sistemas de energías renovables de pequeña potencia en el Perú (Figura N° 2.10).

Figura N° 2.10

APLICACIÓN MICRO-RENOVA PERÚ PARA SISTEMAS AISLADOS



Fuente: Atlas Eólico 2016-MINEM

✓ **Clasificación de los aparatos eólicos**

Los aparatos eólicos se pueden clasificar en:

- Aerogeneradores, que pueden ser de una, dos, tres y cuatro palas
- Aerobombas
- Molinos
- Extractores

✓ **Componentes principales de un generador eólico**

Se pueden considerar dos principales componentes:

Generador

El generador puede estar basado en una máquina de inducción electromagnética que se encarga de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Los generadores que se utilizan pueden ser síncronos o asíncronos, siendo estos últimos los más empleados en las máquinas eólicas.

En los generadores síncronos, la conversión de la energía mecánica en eléctrica se produce a una velocidad constante llamada de sincronismo. El campo magnético es creado por las bobinas enrolladas en los polos del rotor, para lo cual, dichas bobinas debe circular una corriente eléctrica continua. Para producir esta corriente continua pueden emplearse diferentes sistemas de excitación:

- **Autoexcitación estática.** La corriente proviene de la propia energía eléctrica generada previamente transformada de alterna en continua.

- **Excitación con diodos giratorios.** Se crea una CA invertida, con polos en el estator y se rectifica por un sistema de diodos situados en eje común.
- **Excitación auxiliar.** La corriente necesaria se produce mediante un generador auxiliar, que es regulado por un reóstato.

En los generadores asíncronos, dada la simplicidad, robustez y bajo consumo de los clásicos motores eléctricos, estos han empezado a usarse como generadores eléctricos. Para ello es necesario que el par mecánico comunicado al rotor produzca una velocidad de giro superior a la del excitador. El generador asíncrono, consume energía reactiva lo que disminuye la calidad de la energía producida, y por lo tanto, la prima que se paga a la energía eólica.

Góndola

La góndola se completa con un sistema de *control de la potencia* y otro de *control de la orientación*. El primero tiene la doble función de regular la potencia en función de la velocidad del viento instantánea (haciendo funcionar la turbina lo más cerca posible de su potencia nominal) y de interrumpir el funcionamiento de la máquina en caso de viento excesivo. El segundo, en cambio, consta de un control continuo del paralelismo entre el eje de la máquina y la dirección del viento. La góndola se encuentra sobre una *torre* que puede ser de celosía o tubular cónica, anclada al terreno con adecuados cimientos de hormigón armado.

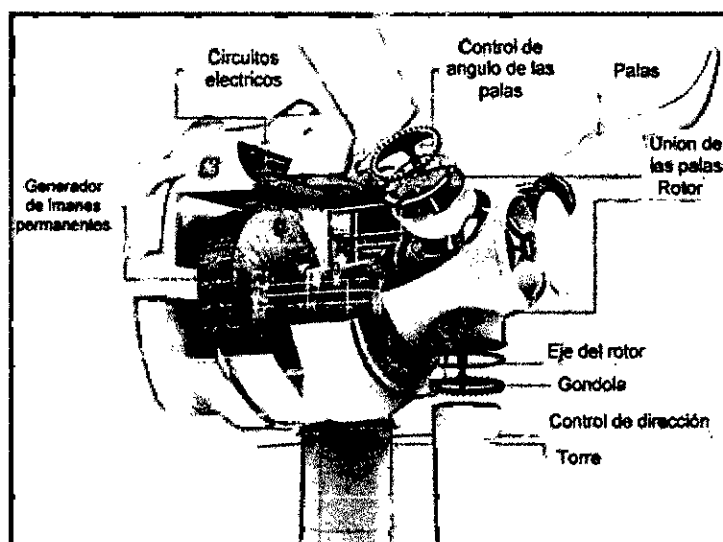
En la Figura N° 2.11 se puede apreciar los componentes del generador eólico, y en la Figura N° 2.12 se presenta las transformaciones de energía en un aerogenerador de eje horizontal.

Los sistemas de conversión de energía eólica pueden ser clasificados de acuerdo a:

- **La capacidad de control de velocidad**
 - ✓ Aerogeneradores de velocidad fija
 - ✓ Aerogeneradores de velocidad variable
- **La capacidad de control de potencia**
 - ✓ Aerogeneradores con regulación por pérdida aerodinámica (stall-controlled) o también conocido como Control Pasivo (Passive Control)
 - ✓ Aerogeneradores con regulación por pérdida aerodinámica activa (active-stall-controlled) o también conocido como control activo o regulación por cambio del ángulo de paso.

Figura N° 2.11

COMPONENTES DE UN GENERADOR EÓLICO

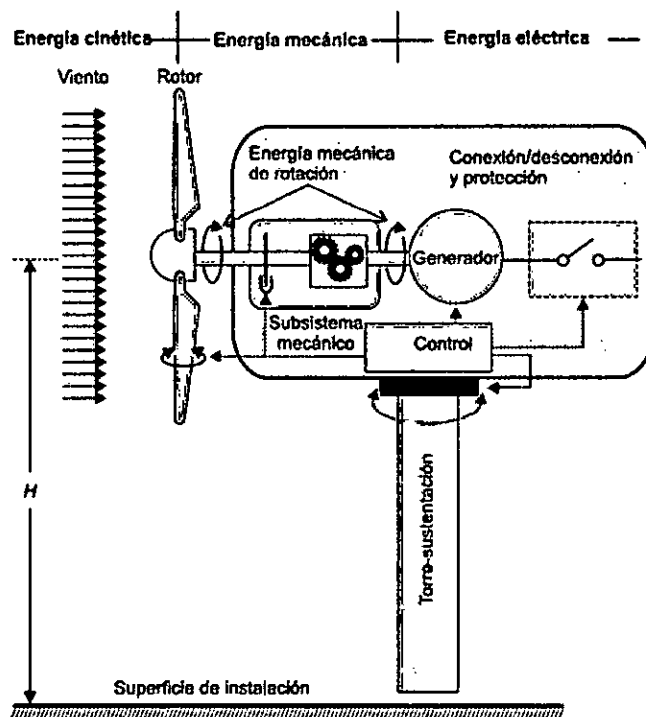


Fuente: Morales Caporal [26]

De acuerdo a [6], los sistemas de generación eólica modernos están equipados con subsistemas de control y supervisión de datos. En tal sentido, en todo aerogenerador hay tres sistemas de control de bajo nivel interactuando simultáneamente:

- El control de la potencia aerodinámica que actúa sobre las hélices y que se basa en técnicas de control asentadas y ampliamente utilizadas, como puede ser el caso del clásico control proporcional-integral (PI) o la estructura de control óptimo.
- El control del generador eléctrico para asegurar la velocidad variable.
- El control de la interfaz con la red y el acondicionamiento de la potencia eléctrica de salida.

Figura N° 2.12
TRANSFORMACIONES DE ENERGÍA EN UN
AEROGENERADOR



Fuente: Centrales de energías renovables [6]

Teniendo en cuenta la división establecida líneas arriba, en cuanto a las posibilidades de actuación y control de velocidad y control de potencia, los sistemas de conversión de energía eólica se pueden clasificar a su vez en:

- Sistemas de velocidad fija y paso fijo FS-FP (*Fixed Speed-Fixed Pitch*)
- Sistemas de velocidad fija y paso variable FS-VP (*Fixed Speed-Variable Pitch*)
- Sistemas de velocidad variable y paso fijo VS-FP (*Variable Speed-Fixed Pitch*)
- Sistemas de velocidad variable y paso variable VS-VP (*Variable Speed-Variable Pitch*)

Los sistemas de velocidad variable y paso variable son los más habituales en sistemas de mediana y alta potencia. El diseño de sistemas de control para este tipo de aerogeneradores resulta especialmente complejo, puesto que junto a las variaciones en la magnitud y dirección del viento, se deben considerar cambios abruptos en la carga eléctrica, lo cual provoca fuertes no linealidades.

En el caso de la presente Tesis, en el Capítulo IV se trata sobre el diseño y simulación de generadores eólicos de velocidad variable y paso variable de pequeña potencia.

✓ **Tipos de generadores utilizados en sistemas eólicos de velocidad variable**

En la literatura científica se han propuesto numerosos sistemas de generación de energía eólica a velocidad variable utilizando una gran variedad de generadores:

- Generadores asíncronos de jaula de ardilla
- Generadores asíncronos de rotor devanado
- Generador asíncrono con doble alimentación por el estator
- Generadores síncronos de rotor devanado y
- Generadores síncronos de imanes permanentes.

La principal ventaja de los generadores asíncronos de rotor devanado es que el convertidor electrónico ha de ser dimensionado para una potencia que es una fracción de la potencia asignada de la máquina, ya que la mayor parte de la potencia se entrega por el estator, que se encuentra conectado directamente a la red. En los generadores asíncronos de rotor en jaula de ardilla, por el contrario, el convertidor electrónico ha de estar dimensionado para toda la potencia de la máquina, además de proporcionar la potencia reactiva precisa para magnetizar la máquina.

El cualquier caso, cuando se utilizan generadores de inducción no es posible prescindir de la caja multiplicadora, ya que para ello es preciso que el generador tenga un elevado número de polos, con lo que su diámetro se hace excesivamente grande y la corriente de magnetización alcanzaría niveles muy elevados. Esto redundaría en un factor de potencia bajo y un rendimiento pobre.

En la actualidad, los sistemas eólicos de velocidad variable comerciales incorporan bien generadores asíncronos de rotor devanado o bien generadores síncronos (ya sea con devanado de excitación o con imanes permanentes).

Es de destacar que los generadores síncronos permiten un mayor margen de velocidades de giro de la máquina que los que incorporan generadores asíncronos de rotor devanado, debido a que

si se amplía el margen de velocidades de funcionamiento, la tensión rotórica aumenta y con ello el dimensionado del convertidor electrónico rotórico. Es este el caso que aborda la presente Tesis en el Capítulo IV.

✓ **Clasificación de Aerogeneradores de acuerdo a su potencia**

Los aerogeneradores de acuerdo a su potencia se pueden clasificar en:

- **Aerogeneradores de pequeña potencia.** Son considerados en este grupo los aerogeneradores cuya potencia está por debajo de los 50 kW.
- **Aerogeneradores de mediana potencia.** Corresponde al sector más desarrollado y extendido, en donde se engloban la mayor parte de las instalaciones conectadas a red. Su potencia está entre 50 KW y 1 MW.
- **Aerogeneradores de gran potencia.** Son aerogeneradores con una potencia mayor 1MW, y representan lo último en tecnología.

✓ **Impacto ambiental**

En primera instancia están el ruido y el impacto visual de las turbinas de viento, si las instalaciones están cercanas a zona pobladas. Asimismo, se puede considerar el impacto sobre las aves, ya que estas mueren al chocar sobre el rotor o la estructura de la turbina. El menor de los impactos sobre las aves es el cambio de comportamiento, costumbres y de hábitat en los lugares donde se instalan estos generadores.

❖ **Energía Solar**

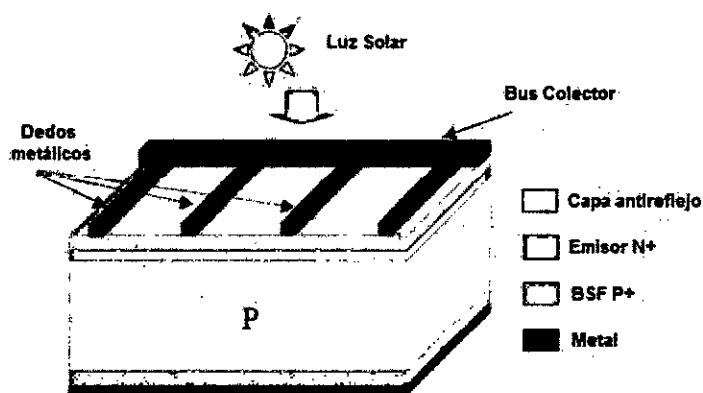
La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol. La radiación solar que alcanza la

Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación, por ejemplo en dispositivos ópticos o de otro tipo. Es una de las llamadas energías renovables, particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia, renovable o energía verde.

La energía solar fotovoltaica es energía eléctrica obtenida directamente de los rayos del sol gracias al efecto fotoeléctrico de un determinado dispositivo; normalmente una lámina metálica semiconductor llamada célula fotovoltaica, o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina.

La tensión generada puede variar entre 0.3V y 0.7V dependiendo del material usado, la temperatura admisible por la celda y el envejecimiento de ésta. Su fabricación está basada en la unión P-N de silicio, pudiendo ser silicio Monocristalino, Policristalino y Amorfo. En la Figura N° 2.13 se presenta el esquema de una celda de silicio monocristalino.

Figura N° 2.13
ESQUEMA DE UNA CELDA DE
SILICIO MONOCRISTALINO



Fuente: Ecología Verde [33]

Actualmente se fabrican celdas solares con una eficiencia mayor al 30%. La energía solar fotovoltaica es principalmente utilizada como una fuente de energía alternativa para sistemas eléctricos residenciales o industriales. Además, otra aplicación importante del uso de esta fuente de energía es en los sistemas de transporte, ésta aplicación se ha dado a conocer en los vehículos eléctricos alimentados por paneles solares los cuales son mencionados a menudo como una alternativa a los vehículos de combustión interna.

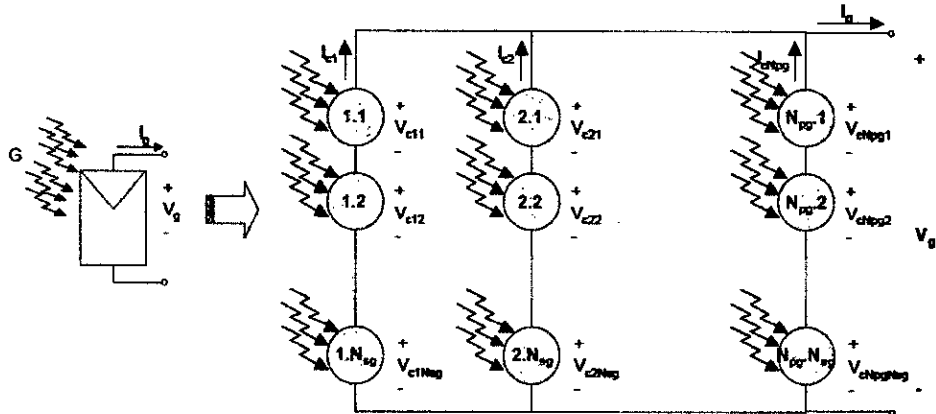
Los paneles solares son un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí mediante configuraciones serie, paralelo o serie-paralelo, dependiendo si se quiere incrementar el voltaje, corriente o ambas. Adicionalmente se usan protecciones mediante diodos a fin de evitar problemas de inversión de polaridad. La orientación de los paneles solares de acuerdo a la ubicación y latitud se realiza buscando una mayor radiación de la energía solar sobre los paneles solares y mejorar su eficiencia. En la Figura N° 2.14 se aprecia la asociación serie-paralelo de celdas fotovoltaicas para formar un panel solar.

Los componentes de un sistema fotovoltaico dependen del tipo de aplicación conectada o no a la red y de las características de instalación. Una instalación fotovoltaica aislada está formada por los equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica.

El modelo de la celda fotovoltaica, se puede representar mediante el circuito de la Figura 2.15.

Figura N° 2.14

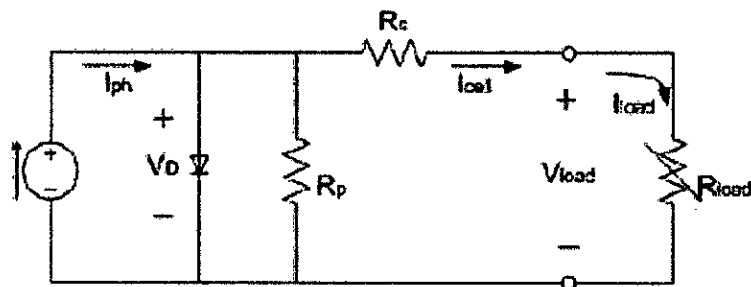
ASOCIACIÓN SERIE-PARALELO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA FORMAR UN PANEL



Fuente: elaboración propia

Figura N° 2.15

CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA CELDA FOTOVOLTAICA CON CARGA



Fuente: elaboración propia

Siendo R_s la resistencia en serie que se conecta con la carga y R_p la resistencia de los cristales de la unión pn que constituyen la celda solar fotovoltaica.

El modelo eléctrico de la celda solar fotovoltaica se puede expresar matemáticamente por la ecuación (2.33), así:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q}{AKT}(V_{load} + I_{cell} R_s)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{load} + I_{cell} R_s}{R_p} \right) \quad (2.33)$$

Siendo:

I_{cell} : Corriente de salida de la celda

I_{ph} : Corriente generada por la luz

I_0 : Corriente de saturación de la celda

q : Carga eléctrica

V_{load} : Voltaje de salida de la carga

A : Constantes ideales

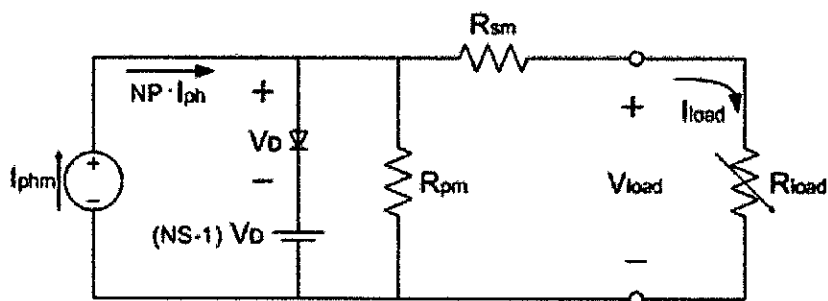
K : Constante de Boltzmann

T : Temperatura de la celda en °K

Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (FV) en el punto de máxima potencia.

La agrupación de celdas fotovoltaicas en serie-paralelo forma el panel fotovoltaico, y se puede representar mediante el circuito de la Figura 2.16, donde R_{sm} es la resistencia en serie equivalente, R_{pm} es la resistencia en paralelo equivalente del panel, NP es el número de celdas en paralelo, NS es el número de celdas en serie e I_{phm} es la corriente suministrada por la fuente de corriente del panel solar.

Figura N° 2.16
CIRCUITO ELÉCTRICO DEL PANEL
FOTOVOLTAICO CON CARGA



Fuente: elaboración propia

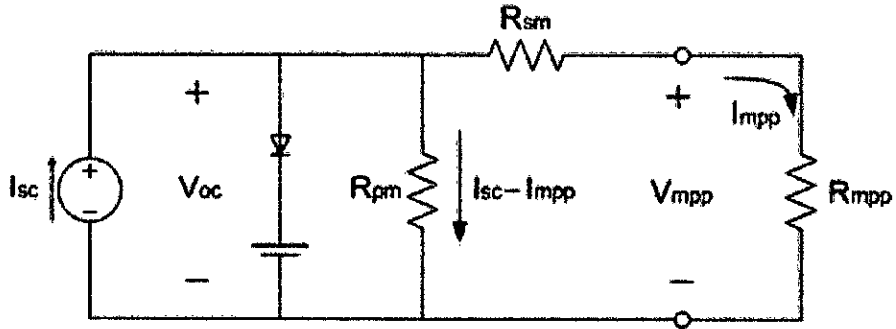
En el proceso de producción de energía se debe buscar siempre que sea posible el punto de máxima potencia. Para obtener el punto de máxima potencia, se considera que R_{pm} es mucho mayor que R_{sm} , la fuente de corriente del panel solar I_{phm} se puede aproximar a la corriente máxima en corto circuito I_{sc} (salida cortocircuitada) y el voltaje del diodo de polarización más el voltaje de la fuente $(NS-1)V_D$ se puede aproximar al voltaje máximo en circuito abierto V_{oc} (tensión en los terminales de conexión sin carga). Por consiguiente, el circuito eléctrico equivalente para operación en el punto de máxima potencia se presenta en la Figura 2.17.

De la Figura 2.17 se puede obtener las expresiones para R_{sm} y R_{pm} , representadas por las ecuaciones 2.34 y 2.35.

$$R_{sm} = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{21.8V - 18.1V}{4.98A} = 0.74\Omega \quad (2.34)$$

$$R_{pm} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{mpp}} = \frac{21.8V}{5.47A - 4.98A} = 44.49\Omega \quad (2.35)$$

Figura N° 2.17
CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL
PANEL FOTOVOLTAICO EN EL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA CON CARGA



Fuente: elaboración propia

Asimismo, de la Figura 10.7 se puede realizar los análisis de circuito abierto y cortocircuito.

✓ **Tensión a circuito abierto del generador**

Del circuito de la Figura 2.17 se puede obtener que:

$$V_{mpp} \approx R_{sm} V_{oc} \approx 0.74 V_{oc} \quad (2.36)$$

✓ **Corriente en cortocircuito del generador**

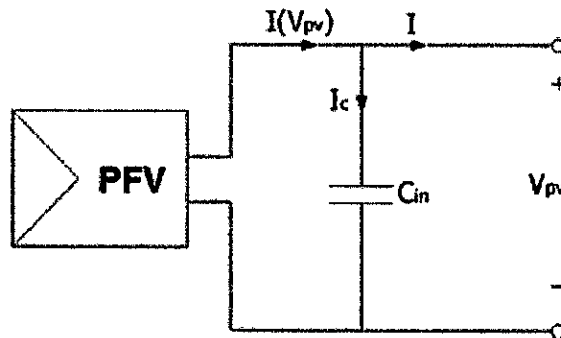
Asimismo, considerando que la corriente I_{sc} es igual a la suma de las corrientes que circulan por las resistencias R_{pm} y R_{sm} , tendremos:

$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_{R_{pm}} + I_{R_{sm}} \\ \Rightarrow V_{R_{pm}} &= V_{R_{sm}} \\ (I_{sc} - I_{mpp}) R_{pm} &= R_{sm} \cdot I_{mpp} \\ I_{mpp} &= \frac{R_{pm}}{(R_{sm} + R_{pm})} I_{sc} ; \quad I_{mpp} = 0.9836 I_{sc} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) mediante las ecuaciones de corriente y voltaje.

Considerando las ecuaciones 2.34 a 2.35 y la conexión del capacitor C_{in} (ver Figura 2.18), se pueden obtener las ecuaciones 3.38 a 3.40, considerando que la temperatura y la radiación solar es constante.

**Figura N° 2.18
DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL PANEL FOTOVOLTAICO
CON CAPACITOR**



Fuente: elaboración propia

$$I(V_{pv}) = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (2.38)$$

$$V_{pv}(I) = bV_{oc} L \ln \left[\frac{I_{sc} - \left(I - I e^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \right)}{I_{sc}} \right] + V_{oc} \quad (2.39)$$

$$P(V_{pv}) = V_{pv} I_{pv} = \frac{V_{pv} I_{sc} - V_{pv} I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (2.40)$$

Donde:

- I**: corriente suministrada por el panel
- V_{pv}**: voltaje de operación del panel
- V_{oc}**: voltaje del panel en circuito abierto
- I_{sc}**: corriente del panel en cortocircuito
- b**: constante característica del panel
- P**: potencia de salida del panel

Asimismo, el capacitor **C_{in}** conectado a los terminales del panel fotovoltaico, tiene la finalidad de que el panel funcione como una fuente de voltaje. A salida del panel se conectará un convertidor DC-DC, que permita regular el voltaje para alimentar al motor DC.

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{in}} (I(V_{pv}) - I) \quad (2.41)$$

Para obtener la ecuación de voltaje cuando el panel proporciona la máxima potencia, tenemos que calcular la derivada parcial de la potencia de salida del panel con respecto al voltaje **V_{pv}**, así:

$$\frac{\partial P}{\partial V_{pv}} = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{1}{b}\right)}} - \frac{V_{pv} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{V_{oc} b - V_{oc} b e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}} = 0 \quad (2.42)$$

Resolviendo la ecuación 2.42, se obtiene la ecuación que describe el voltaje óptimo del panel, dado por:

$$V_{op} = V_{oc} + bV_{oc} \ln \left[b - b e^{\left(\frac{1}{b}\right)} \right] \quad (2.43)$$

Por lo que **V_{op}** sustituye a **V_{pv}** en la ecuación 2.38 para obtener la corriente óptima en el panel. Por consiguiente, la potencia máxima del panel viene dada por:

$$P_{\max} = V_{op} I_{op} = V_{op} \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{b V_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (2.44)$$

La constante característica b del panel fotovoltaico, se obtiene despejando de la ecuación 2.44, según se muestra en la ecuación 2.45.

$$b = \frac{\frac{V_{op}}{V_{oc}} - 1}{\ln \left[1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}} \right]} \quad (2.45)$$

Siendo:

I_{op} : corriente óptima en el punto de máxima potencia I_{mpp}

V_{op} : voltaje óptimo en el punto de máxima potencia V_{mpp} .

En consecuencia, reemplazando valores, de la ecuación 2.45 se obtiene:

$$b = \frac{\frac{18.1}{21.8} - 1}{\ln \left[1 - \frac{4.98}{5.47} \right]} = 0.0703$$

Los módulos o paneles fotovoltaicos están formados por un cristal o lámina transparente superior y un cerramiento inferior entre los que queda encapsulado el sustrato conversor y sus conexiones eléctricas. La lámina inferior puede ser transparente, pero lo más frecuente es un plástico de tedlar. Para encapsular se suele añadir unas láminas finas y transparentes de EVA que se funden para crear un sellado antihumedad, aislante, transparente y robusto.

La energía solar es irradiada al espacio en todas direcciones, esta energía se reparte en una superficie esférica hipotética cuyo

centro es el sol y cuyo radio crece a la misma velocidad que la propia radiación. Cuanto mayor sea el radio de la esfera el área aumenta y la energía incidente disminuye [26]. Si quisiéramos conocer el valor teórico de la energía solar incidente en la tierra vasta emplear la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{S} \quad (2.46)$$

Donde:

I = Irradiancia (Kw/m²)

P = Potencia (W): $4 \times 10^{26} W$

S = Superficie de una esfera (m²): $4\pi R^2$

R = Distancia media tierra sol (m): $1.5 \times 10^{11} m$.

Resolviendo para I , obtenemos:

$$I = (4 \times 10^{26} W) / (4\pi(1.5 \times 10^{11} m)^2) = 1.4 Kw / m^2$$

✓ Componentes de un generador solar

- **Generador solar:** conjunto de paneles fotovoltaicos que captan energía luminosa y la transforman en corriente continua de baja tensión (12 V o 24 V).

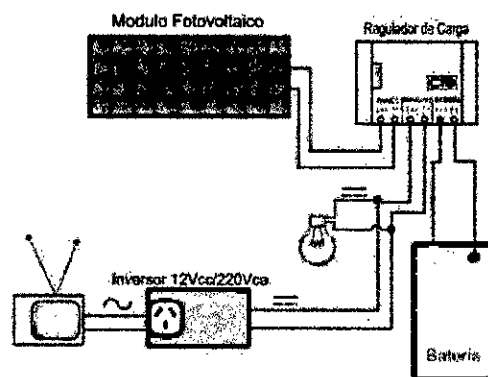
Las celdas fotovoltaicas de las que está compuesto el generador solar (panel solar fotovoltaico), pueden ser de dos tipos:

- ✓ Cristalinas: pueden clasificarse en monocristalinas y policristalinas.
- ✓ Amorfás: cuando el silicio no se ha cristalizado
- **Batería:** almacena la energía producida por el generador. Una vez almacenada existen dos opciones:
 - ❖ Sacar una línea de este para la instalación (utilizar lámpara y elementos de consumo eléctrico).

- ❖ Transformar a través de un inversor la corriente continua en CA.
- **Regulador de carga o convertidor DC-DC:** Su función es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Debe asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficacia.
- **Inversor:** Se encarga de transformar la tensión continua (DC) de las baterías en corriente alterna (AC), la cual alimentará directamente a la carga.

Para realizar la conversión de DC a AC se puede emplear un inversor con la misma técnica de control que el empleado en la generación eólica, por lo que se puede implementar un sistema eólico híbrido que funciona con viento y con energía solar. En la Figura N° 2.19 se puede apreciar las partes que conforman un generador solar fotovoltaico.

Figura N° 2.19
COMPONENTES DE UN GENERADOR SOLAR

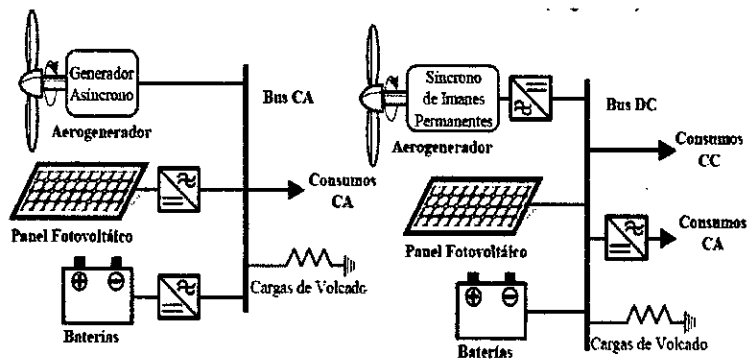


Fuente: Morales Caporal [26]

El aprovechamiento del recurso se puede mejorar si se combinan varias energías renovables. La configuración más común

es aquella que incluye sistemas eólicos y fotovoltaicos con almacenamiento en baterías, pudiendo ser la unión entre los distintos elementos en alterna o continua [5] (Figura N° 2.20).

Figura N° 2.20
SISTEMA EÓLICO-SOLAR CON ALMACENAMIENTO
EN BATERÍAS



Fuente: Carrillo Gonzales [5]

En cuanto a la clasificación de las instalaciones solares fotovoltaicas, podemos encontrar:

✓ **Instalaciones conectadas a red**

En ellas, la energía no se vende directamente al usuario; sino se vende a la empresa eléctrica, previa conexión a la red eléctrica, y luego la empresa es que la vende al usuario.

✓ **Instalaciones autónomas**

En ellas, se produce la electricidad sin ningún tipo de conexión a la red eléctrica, con el fin de dotar a los pobladores de energía eléctrica directamente.

En este trabajo, se considera instalaciones autónomas, que permitan entregar energía a poblados aislados, sean éstas en la costa, sierra o selva.

2.2.2 Fundamento metodológico

En el presente trabajo de investigación se utilizará una metodología encuadrada dentro de una investigación experimental con enfoque cuantitativo, partiendo de la medición de variables dependientes y la manipulación de variables independientes, para lo cual se diseñarán y aplicarán dos métodos de control, como son algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT: Maximum Power Point Tracking) a la etapa del convertidor DC-DC del sistema de generación eólica-solar autónomo de pequeña potencia, y por otro lado, se aplicará la técnica de Modulación por Ancho de Pulso por Vector Espacial (SVPWM) a los inversores de potencia.

Para efectos de implementación a nivel de escala, a fin de validar los resultados de la simulación, se utiliza un Generador Solar Fotovoltaico con orientación automática de dos ejes, de 90W, en el cual se aplican los algoritmos de optimización MPPT y SPWM, contando con Arduino como plataforma de desarrollo. Para efectos de simulación se utiliza Matlab y Simulink.

2.2.3 Fundamento epistemológico

La crisis del petróleo en los 70 y 80 llevó a un cambio en la manera de pensar de la política energética. El interés en las energías alternativas creció y llevó a la creación de programas de investigación y de subvenciones. Pioneros alemanes y daneses desarrollaron los primeros aerogeneradores rentables económicamente, que llevaron a una revolución de la energía eólica, tanto en el aspecto industrial como en el tecnológico [31].

La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento por los fabricantes Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. Aquellas turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 kW cada una. Desde entonces, la talla de las turbinas ha crecido enormemente, y la producción se ha expandido a muchos países. Tal es así que, actualmente se fabrican turbinas de potencias del orden de MW [14].

Es más, la tecnología de aerogeneradores que no producen ruido y no afectan a las aves, ya es una realidad. Tal es así que, el proyecto de aerogenerador piezoeléctrico por vorticidad desarrollado por la empresa Deutechno a través del proyecto Vortex, acaba de ser galardonado con el primer premio en la categoría Energy en el The South Summit 2014 celebrado en la Plaza de las Ventas del 8 al 10 de octubre [10].

La tecnología de este nuevo aerogenerador sin partes móviles o palas supone un salto cualitativo en la producción de energía eólica, considerada como la energía limpia de mayor crecimiento de los últimos años. Vortex se basa en la deformación producida por la vibración inducida por el viento al pasar a través de un cilindro vertical semirrígido, fabricado con fibra de vidrio o carbono y materiales piezoeléctricos. Un innovador sistema de producción de energía eléctrica a través de la deformación mecánica de estos materiales piezoeléctricos por la fuerza del viento.

En cuanto a convertidores de potencia o convertidores de frecuencia usados en generadores de velocidad variable conectados a red, pueden usarse generadores síncronos o asíncronos, asimismo existen topologías de uso comercial. En nuestro caso, se usarán convertidores de frecuencia tanto para la parte de generación como para la parte de carga.

Los convertidores más utilizados en los sistemas eólicos de velocidad variable con generador síncrono, son los convertidores de alterna a alterna con una etapa intermedia de corriente continua. A continuación se mencionan algunas configuraciones más usadas:

A) Puente rectificador del lado del generador

▪ **Puente rectificador controlado del lado del generador**

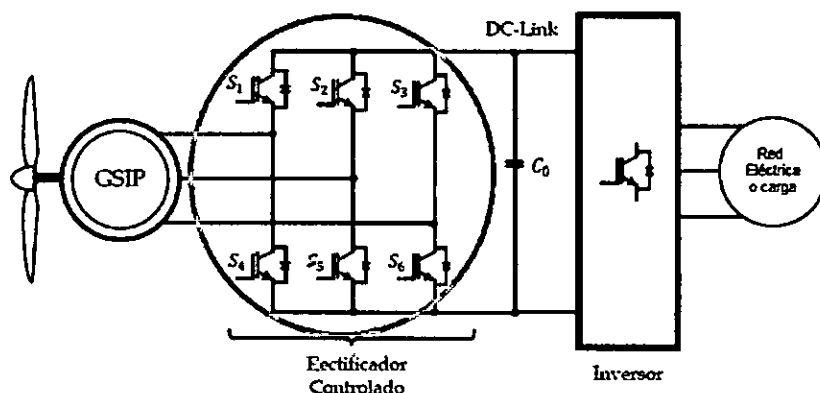
En este caso el tipo de rectificador es un convertidor controlado por modulación de ancho de pulso PWM. Los transistores utilizados pueden ser MOSFETs o transistores bipolares de puerta aislada (IGBT). La salida va acoplada al inversor [4]. Ver Figura 2.21.

▪ **Puente rectificador no controlado con salida por capacitor del lado del generador**

En este caso es un simple rectificador por diodos con salida por capacitor y de éste al inversor [4]. Ver Figura 2.22.

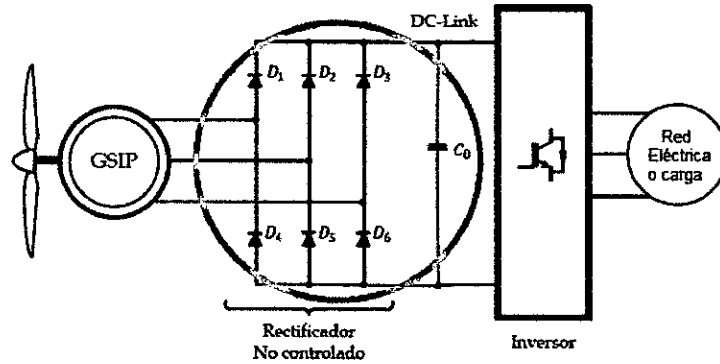
Figura N° 2.21

ESQUEMA DEL PUENTE RECTIFICADOR CONTROLADO



Fuente: Carranza O. [4]

Figura N° 2.22
ESQUEMA DEL PUENTE RECTIFICADOR NO CONTROLADO CON SALIDA POR CAPACITOR

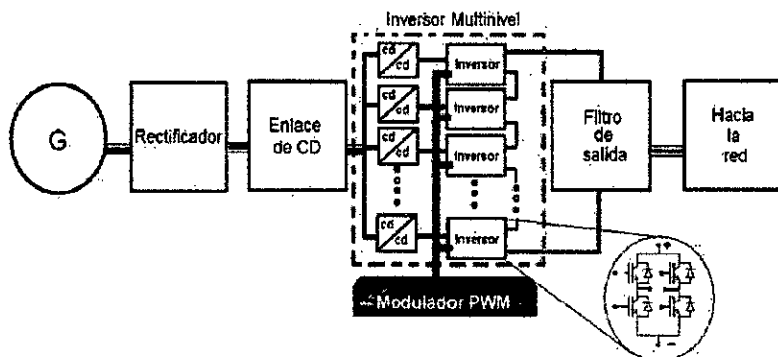


Fuente: Carranza O. [4]

B) Inversor del lado de la carga o red

Es usual el diseño de un inversor trifásico multinivel como el de la Figura N° 2.23, caracterizándose por generar voltajes de salida con muy poca distorsión y bajo dv/dt , pudiendo operar con baja frecuencia de conmutación, provocando menores pérdidas, entre otras ventajas.

Figura N° 2.23
INVERSOR DEL LADO DE LA RED



Fuente: Carrillo G. [5]

Los inversores de frecuencia son controlados por señales PWM, consiguiéndose regular la tensión y la frecuencia de carga con reducido contenido de armónicos. Los semiconductores utilizados en los inversores PWM deben poderse encender y apagar mediante una señal de control en compuerta. En aplicaciones de menos de 600 kVA estos semiconductores suelen ser IGBT's. Para aplicaciones de más potencia se emplean GTO's, con la consiguiente reducción de la frecuencia de conmutación y de la eficiencia y el aumento de la complejidad respecto al empleo de IGBT's.

Entre las técnicas de Control PWM [30], tenemos:

- PWM natural o convencional por muestra de tensión, corriente o mixta
- PWM senoidal (SPWM: Sinusoidal Pulse Width Modulation)
- PWM de vectores espaciales (SVPWM: Space Vector Pulse Width Modulation), denominado también Control Vectorial.

La forma de obtención de la señal PWM natural se muestra en la Figura N° 2.24 [20], [25], [15]. En él se puede observar que la salida V_2 proveniente de un simple amplificador o de la salida de un controlador, se compara con una señal de referencia V_s diente de sierra (oscilador), produciendo una señal troceada V_3 , con un ciclo de

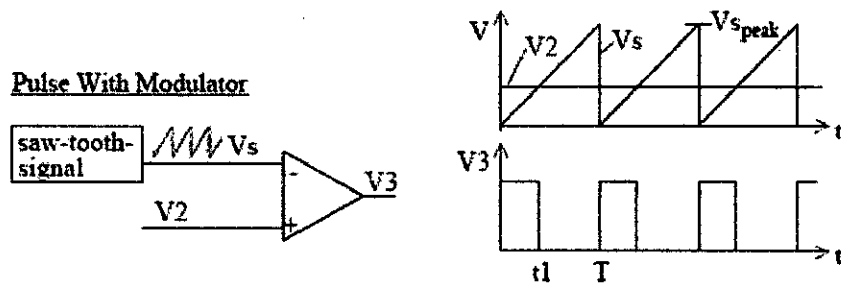
trabajo $D = \frac{t_1}{T}$

Si la salida que ingresa al comparador proviene de un controlador, entonces, éste puede consistir en cualquiera de las siguientes técnicas o estrategias de control:

- Control clásico PID [26], [5], [32]
- Control Difuso [26]
- Control Predictivo [26]

- Control Deslizante, entre otros.

Figura N° 2.24
OBTENCIÓN DE LA SEÑAL PWM



Fuente: Martínez de Alegría. [20]

Es de conocimiento de todos aquellos comprometidos en el diseño de controladores y su implementación, que la tensión de salida del convertidor V_o se resta de la tensión de referencia V_{ref} , produciendo una señal de error "e", la cual es la entrada al controlador, y dependiendo del algoritmo de control, se producirá una salida V_2 ; por lo que se convierte en una señal que modula a la señal diente de sierra del comparador. Si V_2 es mayor que V_s , se produce una señal positiva; por el contrario, si V_2 es menor que V_s , se produce una señal negativa o nula. Por consiguiente el t_1 que es el t_{on} variará de acuerdo a cómo varía V_2 . A mayor V_2 mayor t_1 , aumentando el ciclo de trabajo.

Modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM)

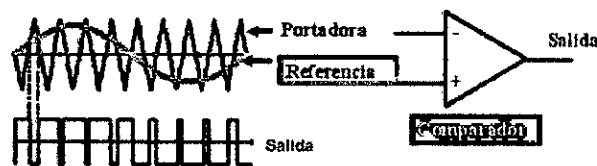
Una ventaja importante en las técnicas de modulación por ancho de pulso, es el de reducir los armónicos; pero no son eliminados de forma total. La reducción de los armónicos se logra mediante cambios en los tiempos de encendido de los transistores, frecuentemente mosfet e IGBT.

La técnica SPWM se basa en emplear una modulación múltiple (varios pulsos de disparo en cada medio ciclo de voltaje de salida), el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso.

Como se puede observar de la Figura N° 225, en el que se muestra el esquema de generación SPWM, para producir en la salida del comparador una onda cuadrada con ancho de duración variable, se necesitan de dos señales, una de ellas es una señal de referencia senoidal (U_{sc}), mientras que la otra es una triangular de alta frecuencia (U_{tc}). La frecuencia del inversor es la misma que la frecuencia de referencia (f_{sc}) y la frecuencia de la portadora (f_{tc}) se mantiene constante [34].

Figura N° 2.25

GENERACIÓN DE LA SEÑAL SPWM

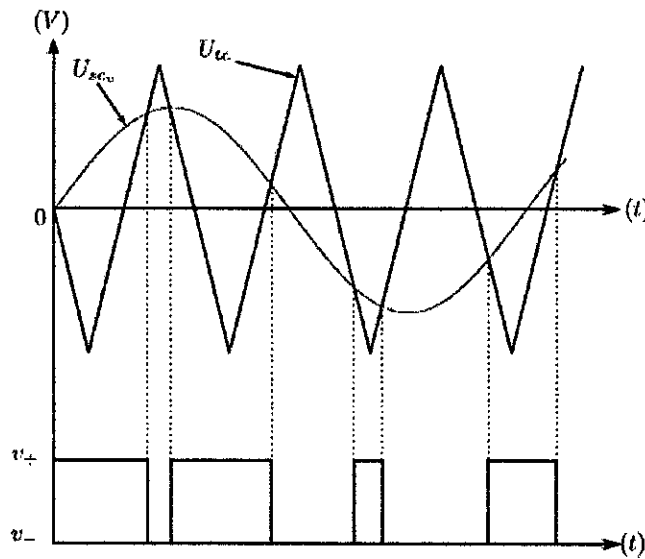


Fuente: Martínez de Alegría. [20]

En un sistema trifásico, el control exige que se deben usar tres (03) señales de referencia senoidal iguales U_{sc} desfasadas 120° , para así poder tener un sistema balanceado. La señal de salida de cada comparador viene a ser la señal de disparo de la puerta (G) de los mosfet o IGBT, por lo que en un sistema trifásico se necesitan 6 señales de disparo o de control, siendo activadas en pares ($v+$ y $v-$).

En la Figura N° 2.26 se puede observar con mayor detalle, la generación PWM (onda cuadrada de ancho de pulso variable), en función de la señal de referencia U_{scv} y la señal portadora triangular U_{cc} .

Figura N° 2.26
ILUSTRACIÓN DE LA GENERACIÓN
DE LA SEÑAL SPWM



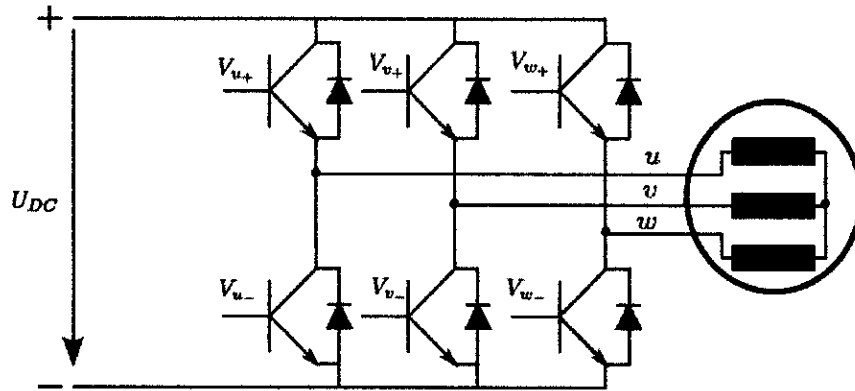
Fuente: Rojas E. [34]

Modulación de ancho de pulso por vector espacial (SVPWM)

La modulación por ancho de pulso por vector espacial, es uno de los métodos más utilizados en inversores trifásicos de potencia.

Sean u, v, w los puntos de unión de la carga trifásica de la Figura N° 2.27. Se define el estado lógico "0" cuando el punto de unión está conectado al potencial negativo V_- encendido, y el estado lógico "1" cuando el punto de unión está conectado al potencial positivo V_+ encendido. Esta definición se debe a que solamente uno de los interruptores se debe encender a la vez [21].

Figura N° 2.27
ILUSTRACIÓN DE LA GENERACIÓN
DE LA SEÑAL SVPWM



Fuente: Rojas E. [34]

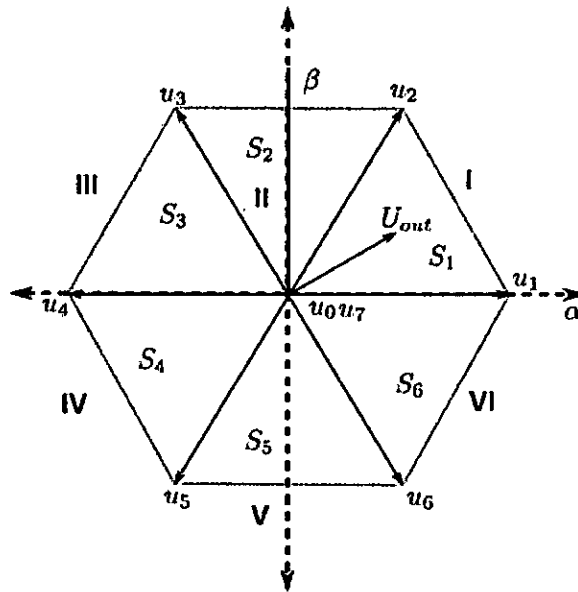
Ahora, asumiendo un vector de coordenadas $\alpha\beta$, donde β es el eje vertical y α es el eje horizontal, se puede realizar una transformación lineal dada por Toliyat y Campbell, así:

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{um} \\ U_{vm} \\ U_{wm} \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

La ecuación (2.47) nos ayuda para realizar el diagrama vectorial, mostrado en la Figura N° 2.28.

Los seis vectores activos en la Figura N° 2.28, forman seis sectores que se muestran en la Tabla 2.2.

Figura N° 2.28
VECTORES EN COORDENADAS $\alpha\beta$



Fuente: elaboración propia

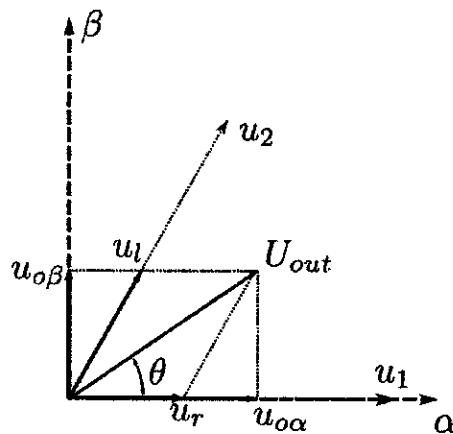
Tabla N° 2.2
VECTORES EN COORDENADAS $\alpha\beta$

Sector	ángulo inicial grados	ángulo final grados	Vectores
I	0	60	$u_1 - u_2$
II	60	120	$u_2 - u_3$
III	120	180	$u_3 - u_4$
IV	180	240	$u_4 - u_5$
V	240	300	$u_5 - u_6$
VI	300	360	$u_6 - u_1$

Fuente: elaboración propia

El vector resultante U_{out} puede obtenerse de la combinación lineal de u_r y u_l en las direcciones de u_1 y u_2 respectivamente (ver Figura N° 2.29).

Figura N° 2.29
DETERMINACIÓN DE U_{out} EN FUNCIÓN DE u_l y u_r



Fuente: Rojas E. [34]

Considerando $\theta = \arctan\left(\frac{u_{0\beta}}{u_{0\alpha}}\right)$, y al reemplazar éste por las restricciones de ángulos dados por los sectores S1, S2, ..., S6, se pueden determinar las siguientes condiciones:

$$S1: 0 < u_{0\beta} < \sqrt{3}u_{0\alpha}$$

$$S2: |\sqrt{3}u_{0\alpha}| < u_{0\beta}$$

$$S3: 0 < u_{0\beta} < -\sqrt{3}u_{0\alpha}$$

$$S4: 0 > u_{0\beta} > \sqrt{3}u_{0\alpha}$$

$$S5: u_{0\beta} < -|\sqrt{3}u_{0\alpha}|$$

$$S6: 0 > u_{0\beta} > -\sqrt{3}u_{0\alpha}$$

Es posible determinar los tiempos de conmutación, según la siguiente transformación lineal:

$$\begin{pmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}T_p^*}{U_{DC}} \begin{pmatrix} \operatorname{sen}\left(\frac{k\pi}{3}\right) & -\operatorname{cos}\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ -\operatorname{sen}\frac{(k-1)\pi}{3} & \operatorname{cos}\frac{(k-1)\pi}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{0\alpha} \\ u_{0\beta} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

y los ciclos de trabajo se definen como:

$$\begin{pmatrix} D_k \\ D_{k+1} \end{pmatrix} = \sqrt{3} \begin{pmatrix} \operatorname{sen}\left(\frac{k\pi}{3}\right) & -\operatorname{cos}\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ -\operatorname{sen}\frac{(k-1)\pi}{3} & \operatorname{cos}\frac{(k-1)\pi}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{u_{0\alpha}}{U_{DC}} \\ \frac{u_{0\beta}}{U_{DC}} \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

Siendo T_p^* el tiempo de muestreo.

En cuanto al desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica, tenemos que hacer referencia al impulso en la fabricación de celdas solares, y por lo tanto de paneles solares más eficientes.

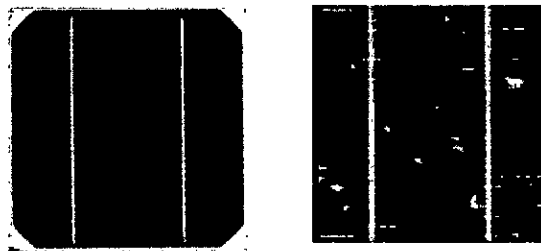
Actualmente, en la fabricación de células fotovoltaicas se utiliza mayormente silicio, ya que es el segundo elemento más abundante en la Tierra y, por lo tanto, su obtención resulta económica. Con todo, además del silicio se emplean otros elementos en las aplicaciones fotovoltaicas, como cobre, galio o cadmio. En general, se distingue entre las tecnologías de capa gruesa y las de capa fina, que pasamos a explicar con más detalle:

✓ Tecnologías de capa gruesa

Con un rendimiento máximo de 22 %, las células de silicio monocristalino presentan el rendimiento más elevado dentro de las

tecnologías fotovoltaicas. En la fabricación se utiliza una masa fundida, a partir de la cual se obtienen barras de silicio de alta pureza (lingotes) que son cortadas en rebanadas finas (obleas); estas obleas son procesadas para convertirlas en células fotovoltaicas. En la Figura N° 2.30 se presentan las células de silicio Monocristalino y policristalino.

Figura N° 2.30
PANELES SOLARES: MONOCRISTALINO (IZQUIERDA),
POLICRISTALINO (DERECHA)



Fuente: Ecología Verde. [33]

✓ **Tecnologías de capa fina**

Con un rendimiento relativamente bajo de entre un 5 y 10 por ciento, el silicio amorfo presenta una eficiencia más baja que las dos tecnologías de silicio cristalino (monocristalino y policristalino). Sin embargo, el mejor comportamiento en condiciones de luz difusa y la fabricación más económica debido al empleo de menos material son ventajas importantes de las células de capa fina producidas con silicio amorfo con respecto a las células de silicio cristalino. Para la fabricación se decanta una capa de silicio de menos de 1 μm de grosor sobre vidrio u otro material de sustrato. En la Figura N° 2.31 se presenta un panel solar de capa fina.

Figura N° 2.31
PANELES SOLARES DE CAPA FINA



Fuente: Ecología Verde. [33]

Asimismo, podemos encontrar otras tecnologías que se pasan a describir brevemente [13]:

✓ **Tecnología orgánica**

Las células de la fotovoltaica orgánica (FVO) están fabricadas con compuestos de hidrocarburos que, de forma similar al silicio amorfo, se aplican sobre el material de sustrato. La ventaja de este tipo de células fotovoltaicas es que, a diferencia de lo que ocurre con las células fotovoltaicas inorgánicas, su rendimiento no se ve afectado si la radiación disminuye y las temperaturas aumentan. Sin embargo, el rendimiento de las células FVO está por debajo del correspondiente a las células convencionales/tradicionales (capa fina y capa gruesa).

✓ **Tecnología de concentración**

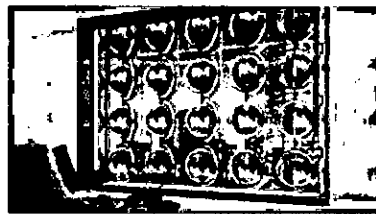
En la tecnología de concentración fotovoltaica (FVC) se usan sistemas de espejos y lentes, lo que hace que se concentre una gran intensidad luminosa sobre una célula fotovoltaica. De este modo, actualmente se pueden alcanzar rendimientos de hasta un 43,6 por ciento. No obstante, los costes del sistema suelen ser

mucho más elevados que los de las instalaciones fotovoltaicas tradicionales, debido a que se necesitan sistemas de seguimiento. En la FVC se utilizan materiales similares a los usados en las células CIGS.

En la Figura N° 2.32 se puede apreciar la esfera solar conocida como Rawlemon, con la que se consigue producir hasta un 70 por ciento más de energía solar que un panel fotovoltaico clásico. Sin embargo, no puede considerarse una tecnología diferente, pues se trata de una nueva versión de la energía solar fotovoltaica de concentración, conocida como CPV [33], [13], [12].

Figura N° 2.32

TECNOLOGÍA DE CONCENTRACIÓN CPV



Fuente: Ecología Verde. [33]

2.3 Definiciones de términos básicos

2.3.1 Glosario de términos básicos

- ✓ **Generador eólico:** es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). El movimiento de rotación de las aspas o álabes es transmitido al eje del generador eléctrico, el cual transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Su predecesor es el molino de viento que se empleaba para la molienda y obtención de harina.

- ✓ **Generador solar:** es un generador eléctrico que transforman los rayos solares en energía eléctrica. Uno de los componentes principales es el módulo fotovoltaico.

- ✓ **Poblados aislados:** son pueblos distantes de las ciudades, que generalmente no tienen acceso a los mercados y a los servicios básicos de la "modernidad", tales como el comercio, la electricidad y el agua, fundamentalmente.

- ✓ **Control Predictivo:** es una técnica de control que se basa en el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura.

- ✓ **Control Difuso:** es una técnica de control que se basa en la selección adecuada de funciones de pertenencia y del establecimiento de una serie de reglas basadas en una lógica multivaluada. Esta lógica presupone por ejemplo que si hablamos de la temperatura, ésta puede considerar diferentes niveles, como por ejemplo: muy fría, fría, tibia, caliente, muy caliente; cosa que en la lógica Booleana solo se consideraría como fría o caliente. Para aplicar esta técnica no se necesita el modelo del proceso; sino las consideraciones del experto.

- ✓ **Control Deslizante:** Control de estructura variable. Es una metodología moderna de control que está despertando interés debido a sus características como son: robustez, rápida respuesta, rechazo a perturbaciones desconocidas y fácil implementación mediante un algoritmo matemático simple.

✓ **Control MPPT:** Control del punto de máxima potencia, utilizado frecuentemente en generación fotovoltaica, permitiendo optimizar la generación de energía proveniente de los paneles solares fotovoltaicos. Existen varios métodos MPPT, entre los cuales podemos considerar:

- Perturbación y Observación (P & O)
- Conductancia Incremental
- Retroalimentación de la señal de potencia (PSF)
- Medición de la velocidad del viento (WSM), usado en aplicaciones eólicas.
- Fractional Open Circuit Voltage
- Fractional Short Circuit Current
- Fuzzy Logic Control
- Neural Network
- Load Line
- Ripple Correlation Control (RCC)

2.3.2 Abreviaturas utilizadas

CD: Corriente directa

CA: Corriente alterna

DC: Direct current (corriente directa)

AC: Altern current (corriente alterna)

MPPT: Máximum Power Point Tracking (búsqueda del punto de máxima potencia)

PWM: Pulse With Modulation (Modulador por ancho de pulso)

SVM: Space Vector Modulation

SVPWM: Space Vector Pulse With Modulation

SPWM: Senoidal Pulse With Modulation

MBPC: Model Based Predictive Control (Control Predictivo basado en modelo)

PID: Proporcional Integral Derivativo

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolar de puerta aislada)

GTO: Gate Turn Off thyristor (tiristor apagable por puerta)

FVO: Fotovoltaica orgánica

FVC: Concentración fotovoltaica

CPV: Concentrator Photovoltaics (concentrador fotovoltaico)

CIGS: Copper indium gallium selenide (material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio)

GSFV: Generador solar fotovoltaico

GE: Generador eólico

GSIP: Generador Síncrono de Imanes Permanentes

CAPÍTULO III

VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Definición de variables

Las variables presentes en nuestro sistema eólico-solar son:

✓ **Variables independientes:**

Variable X: Técnicas de Control MPPT y SVPWM.

✓ **Variables dependientes:**

Variable Y: Potencia y calidad de energía generada.

✓ **Variables intervinientes:**

Variable Z: Perturbaciones presentes en el sistema, sea en la entrada o en la salida.

3.2 Operacionalización de variables

Las variables que conforman el objeto de estudio deben ser medidas, lo que nos permitirá obtener datos e información de importancia, que serán tabulados, ordenados y procesados; lo que significa que deberá usarse formulaciones estadísticas, que permitan una cuantificación y análisis de los datos correspondientes a las variables participantes en el sistema.

En este sentido, las variables independientes (X), las variables dependientes (Y) y las variables intervinientes (Z), vienen definidas por los correspondientes indicadores, que se pasan a anotar:

Variable X: Técnicas de Control MPPT y SVPWM.

Indicadores:

- ❖ Señales de control PWM generados por el controlador MPPT para el convertidor DC/DC Buck y Boost, correspondientes al generador solar fotovoltaico (GSFV) y para el convertidor DC/DC Boost del generador eólico (GE).
- ❖ Señales de Control Vectorial PWM (SVPWM) para el convertidor DC/AC (inversor), de ambos generadores (GSFV y GE).

Las señales de control generados tienen como **parámetros** el voltaje de control con un tiempo de establecimiento o asentamiento pequeño, éste último, a fin de efectuar un control más rápido.

Variable Y: Potencia y calidad de energía generada.

Indicadores:

- ❖ Potencia generada en DC y AC
- ❖ El voltaje generado en la etapa de alterna.
- ❖ La frecuencia generada por la red trifásica.

El parámetro de salida generado, en este caso el voltaje, debe presentar un sobrepico pequeño en estado transitorio.

Variable Z: Perturbaciones presentes en el sistema, sea en la entrada o en la salida.

Indicadores:

- ❖ Variaciones de la Humedad relativa, lo que indirectamente corresponde a las variaciones de la temperatura, siendo el parámetro de medida en °C y/o en °K.
- ❖ La turbulencia del viento.

- ❖ Variaciones de la dirección del viento, que puede ser parametrizada por mediciones de dirección N, E, O, S, N-E, S-E, etc.

3.3 Hipótesis

3.3.1 Hipótesis general

“La aplicación de algoritmos de Control MPPT y SVPWM, permitirán mejorar la eficiencia en la generación y calidad de la energía disponible del generador eólico-solar”

3.3.2 Hipótesis específicas

- **Hipótesis específica N° 1**

“La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SVPWM al bus de alterna del generador eólico, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC”.

- **Hipótesis específica N° 2**

“La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SVPWM al bus de alterna del generador solar fotovoltaico, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC”.

- **Hipótesis específica N° 3**

“La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SPWM al bus de alterna del generador solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes de 90W, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC”.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

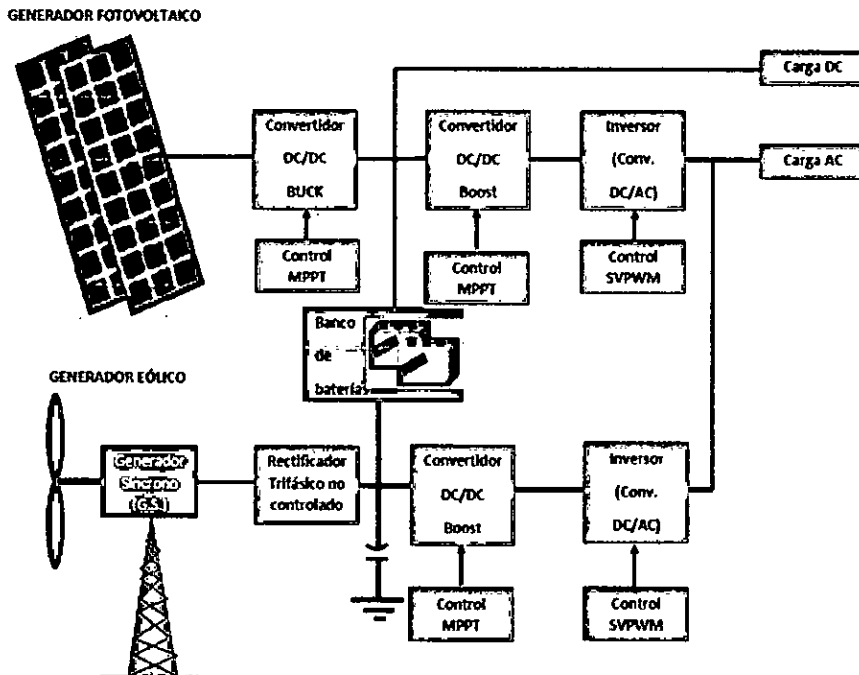
4.1 Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo. Se aplican herramientas matemáticas para el modelado y su simulación en lazo abierto, así como para el diseño de los controladores y la simulación de la respuesta del sistema de control en lazo cerrado.

4.2 Diseño de la investigación

La estructura del sistema eólico solar desarrollada en la presente Tesis, se muestra en la Figura N° 4.1.

Figura N° 4.1
ESQUEMA DEL SISTEMA EÓLICO-SOLAR DE PEQUEÑA
POTENCIA



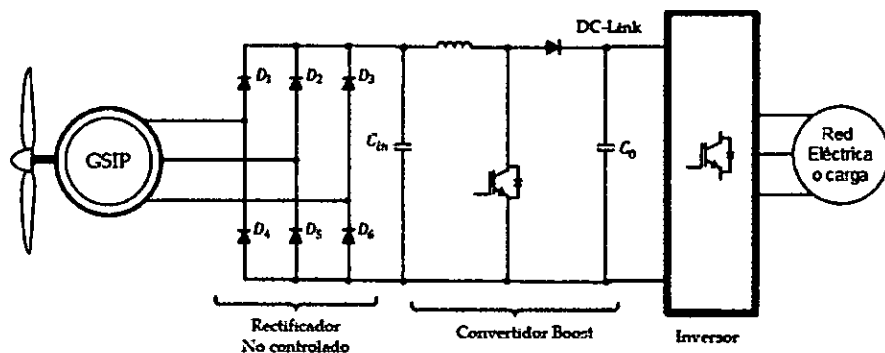
Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Diseño del subsistema eólico

En concordancia con el esquema de la Figura N° 4.1, una propuesta económica y fiable para generadores eólicos de transmisión directa de pequeña potencia usada en esta Tesis, se muestra en la Figura 4.2, en el que se puede apreciar un convertidor de potencia conformado por:

- Un puente rectificador de diodos, ya que es la más sencilla, la que tiene menores pérdidas. Tiene el inconveniente de que su tensión de salida no está controlada, sobre todo en el caso de máquinas de imanes permanentes, lo que podría afectar al inversor.
- Un convertidor DC/DC Boost en el lado de continua que permita mantener constante la tensión a la entrada del inversor, con lo cual se resolvería el inconveniente indicado líneas arriba.
- Un inversor trifásico en la etapa de red o carga, compuesto por MOSFETs o IGBTs.

Figura N° 4.2
ESQUEMA DE LAS ETAPAS AC/DC/AC DE UN
GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES
DE TRANSMISIÓN DIRECTA



Fuente: Carranza O. [4]

Previamente se efectuará el modelado y simulación del generador síncrono de imanes permanentes.

Para el sistema original

- **Modelado y simulación del generador síncrono de imanes permanentes (GSIP)**

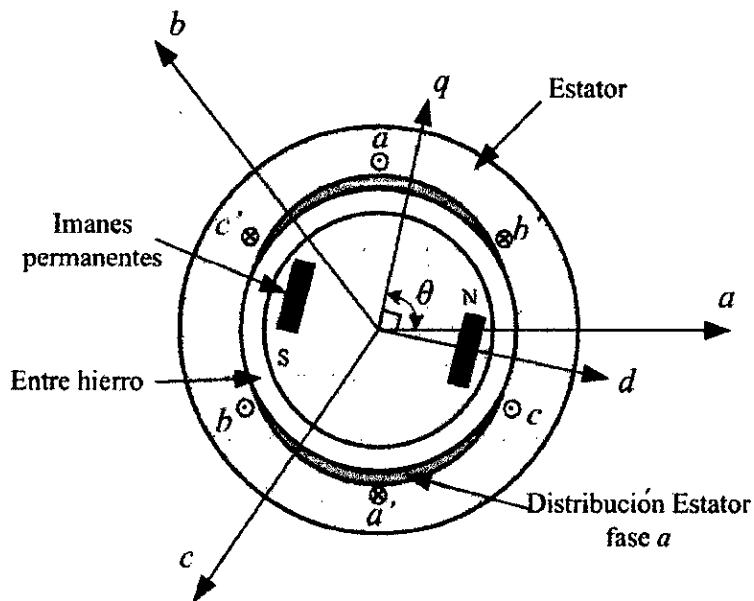
Un generador síncrono de imanes permanentes es un generador en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante, y se reduce el mantenimiento comparado con el generador síncrono (SG), debido a que no se tiene que alimentar el rotor para generar campo magnético. Los GSIP son muy utilizados en generadores eólicos de velocidad variable y paso variable, con las siguientes características mejoradas:

- ✓ Eficiencia
- ✓ Relación torque – inercia
- ✓ Relación torque – volumen
- ✓ Densidad de flujo magnético
- ✓ Relación de aceleración y desaceleración
- ✓ Costo de mantenimiento

Los generadores síncronos de imanes permanentes tienen el mismo principio de funcionamiento que los generadores síncronos, con la diferencia que el campo magnético en el rotor es generado por imanes permanentes, con lo que el flujo es constante, y se reduce el mantenimiento comparado con el SG, ya que no se tiene que alimentar el rotor para generar el campo magnético. Los GSIP son empleados principalmente es SGE de baja potencia de varias decenas de kW, ya que está limitada a las propiedades de los materiales magnéticos; sin embargo, en la actualidad hay varios

fabricantes que empiezan a construirlos de potencias de varios MW, esto se logra empleando materiales con una alta densidad de flujo magnético. En la Figura N° 4.3 se presenta el diagrama conceptual del GSIP en los marcos de referencia abc y dq.

Figura N° 4.3
DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL GENERADOR DE
IMANES PERMANENTES



Fuente: Morales Caporal [26]

Al tener un campo magnético constante en el rotor aumenta la eficiencia, ya que no se necesita potencia externa para generar el campo magnético. Los SGE con GSIP operan a velocidad variable y pueden trabajar en red eléctricas aisladas [30]. Al girar el rotor, se produce un campo magnético giratorio dentro del generador.

Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador. Los polos magnéticos en el rotor pueden ser de dos tipos: polos

salientes que es un polo proyectado hacia afuera de la superficie del rotor y polos no salientes (o polos lisos) es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor. Para este caso particular se considera que el generador es de polos no salientes o lisos, para realizar un análisis simplificado [4].

En los generadores síncronos, la frecuencia eléctrica se produce y entrelaza o sincroniza con la velocidad mecánica de rotación del generador, esto sucede, debido a que el campo magnético que tiene el rotor genera un voltaje en el estator. Si el rotor gira, el campo magnético induce un voltaje a una frecuencia que depende de la velocidad de giro del rotor, ya que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, lo que permite establecer que:

$$\omega_e = \frac{n_p}{2} \omega_m \quad (4.1)$$

Siendo:

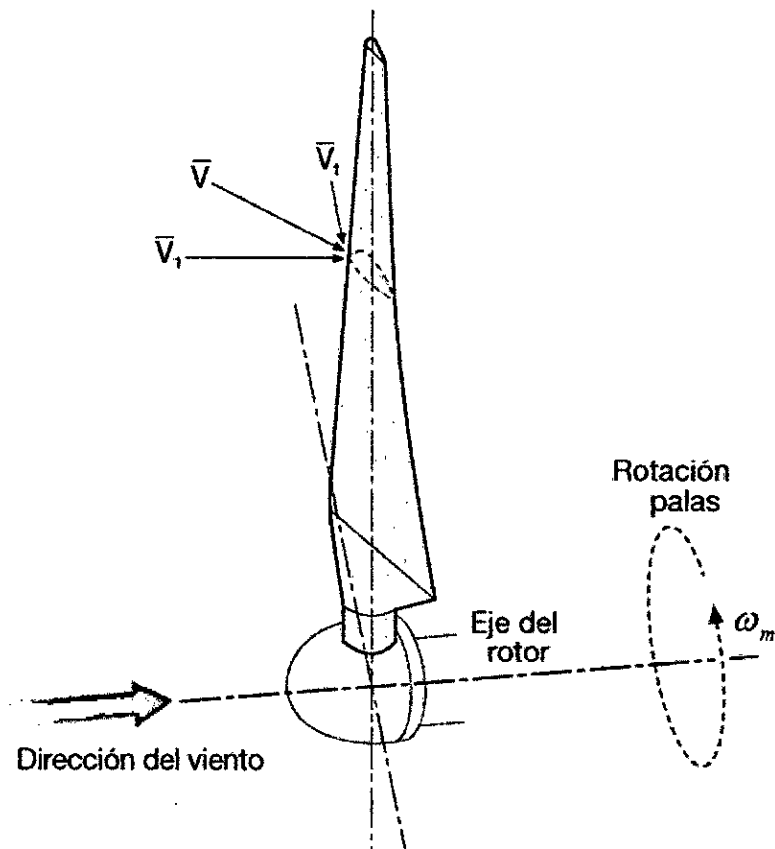
- ✓ ω_m la velocidad mecánica angular en radianes por segundo
- ✓ n_p es el número de polos del generador
- ✓ ω_e es la frecuencia eléctrica angular del voltaje generado en radianes por segundo

En la Figura N° 4.4 se muestra la pala y el eje de rotación del rotor, así como las componentes de la velocidad del viento, como resultado de la rotación de las palas o álabes.

Considerando que frecuentemente la velocidad de rotación del eje (n_m) se da en RPM, la velocidad angular del rotor viene dada por:

$$\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \quad (4.2)$$

Figura N° 4.4
COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO
SOBRE LA PALA DEL AEROGENERADOR



Fuente: Ilustración ABB

Reemplazando la ecuación (4.2) en (4.1) se obtiene:

$$\omega_e = \frac{\pi n_p n_m}{60} \quad (4.3)$$

El voltaje trifásico generado (E_a , E_b y E_c) por el campo magnético giratorio depende del flujo magnético (ϕ), de la constante de

construcción (N_c) y de la de la velocidad mecánica angular, como se muestra en (4.4).

$$\begin{aligned} E_A &= N_c \phi \omega_m \text{sen}(\omega_e t) \\ E_B &= N_c \phi \omega_m \text{sen}\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ E_C &= N_c \phi \omega_m \text{sen}\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Debido a que N_c y ϕ dependen de las características de cada generador, se considera que la constante de fuerza electromotriz (K_{fem}), relaciona ambos parámetros de la siguiente forma:

$$K_{fem} = N_c \phi \quad (4.5)$$

Reemplazando la ecuación (4.5) en (4.4), se obtiene:

$$\begin{aligned} E_A &= K_{fem} \omega_m \text{sen}(\omega_e t) \\ E_B &= K_{fem} \omega_m \text{sen}\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ E_C &= K_{fem} \omega_m \text{sen}\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Por lo que el voltaje pico o máximo de E_A será:

$$E_{Apico} = K_{fem} \omega_m \quad (4.7)$$

Asimismo, el voltaje eficaz en cualquiera de las fases del estator trifásico es:

$$E_{Ams} = \frac{K_{fem} \omega_m}{\sqrt{2}} \quad (4.8)$$

Los voltajes E_A , E_B y E_C , son los voltajes inducidos en cada una de las fases del generador; sin embargo estos voltajes no son

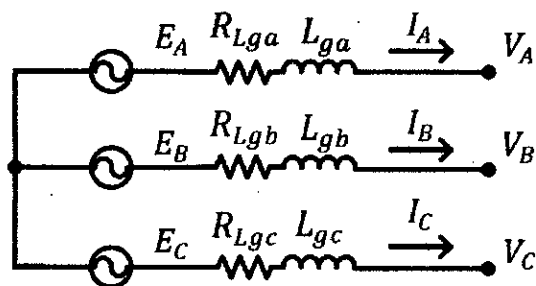
normalmente los que se presentan en los terminales de salida del generador V_A , V_B y V_C .

La diferencia se debe a varios factores, como por ejemplo la distorsión del campo magnético del entrehierro, la autoinductancia de las bobinas del estator (L_{ga} , L_{gb} y L_{gc}) y las resistencias de las bobinas (R_{Lga} , R_{Lgb} y R_{Lgc}).

En consecuencia, el circuito equivalente de generador viene representada en la Figura N° 4.5

Figura N° 4.5

**CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR
SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES**



Fuente: Mohan N. [25]

Las ecuaciones que se obtienen del circuito equivalente del GSIP, pueden escribirse así:

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = -R_{Lga} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} - L_{ga} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Por simplicidad se considera que $R_{Lga} = R_{Lgb} = R_{Lgc}$ y $L_{ga} = L_{gb} = L_{gc}$

Aplicando la transformada de Park (T) y la transformada de inversa de Park (T^{-1}), se obtiene la representación en el marco de referencia síncrono dq .

La transformada de Park se representa por la ecuación 4.10

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Considerando que: $V_{ABC} = T^{-1}V_{dq0}$; $I_{ABC} = T^{-1}I_{dq0}$; $E_{ABC} = T^{-1}E_{dq0}$, sustituyendo la ecuación 4.2 en 4.9 y operando se obtienen las siguientes ecuaciones:

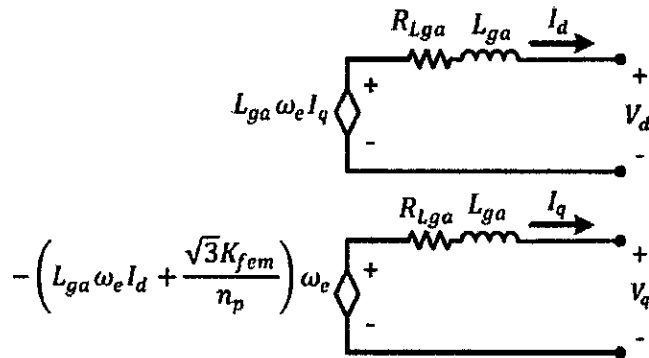
$$\begin{aligned} V_d &= -R_{Lga}I_d + \omega_e L_{ga}I_q - L_{ga} \frac{d}{dt} I_d \\ V_q &= -R_{Lga}I_q - \omega_e L_{ga}I_d - L_{ga} \frac{d}{dt} I_q - \sqrt{3}K_{fem} \frac{\omega_e}{n_p} \end{aligned} \quad (4.11)$$

De las ecuaciones definidas por 4.11 se obtiene el circuito equivalente en el marco de referencia síncrono dq , tal como se puede apreciar en la Figura N° 4.6.

El GSIP es una máquina que convierte potencia mecánica (P_{mec}) en potencia eléctrica (P_e), la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_e = 3E_{Arms} I_{Arms} \frac{R_{gLa}}{\sqrt{R_{gLa}^2 + (\omega_e L_{ga})^2}} \quad (4.12)$$

Figura N° 4.6
CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR
SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES EN EL
MARCO DE REFERENCIA dq



Fuente: Mohan N. [25]

Para efectos de simplificación, hacemos $I_{Arms} = I_g$, con lo cual el torque inducido se puede denotar como el torque eléctrico (T_e) del generador, dado por:

$$T_e = \frac{3K_{fem} I_g}{\sqrt{2}} \frac{R_{gLa}}{\sqrt{R_{gLa}^2 + (\omega_e L_{ga})^2}} \quad (4.13)$$

Considerando que la corriente del generador y el voltaje están en fase, la ecuación del torque eléctrico se reduce a:

$$T_e = \frac{3K_{fem} I_g}{\sqrt{2}} \quad (4.14)$$

Para nuestro caso se está considerando un generador trifásico de 6KW, considerado en el rango de pequeña potencia. La selección del generador está relacionado con las características de la turbina eólica, y que para efectos de modelamiento del generador, se ha seleccionado una turbina Bornay 6000, cuyas características se presentan en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1
CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA BORNAY 6000

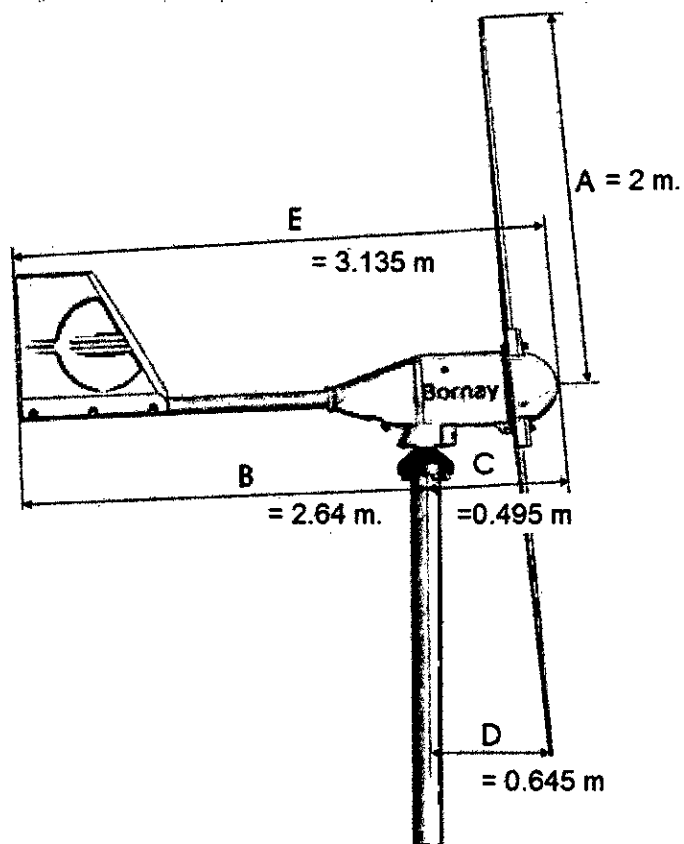
ESPECIFICACIONES	CARACTERÍSTICAS
Número de hélices	3
Diámetro de las palas	4 m.
Material	Fibra de vidrio / carbono
Dirección de rotación	Anti-horaria
Velocidad de rotación	600 RPM
Regulación	Regulación electrónica y pasiva por inclinación de sus palas
Velocidad de arranque	3.5 m/s
Velocidad para potencia nominal	12 m/s
Velocidad para frenado automático	14 m/s

Fuente: Manual del generador Bornay 6000

En la Figura N° 4.7 se puede observar al aerogenerador Bornay 6000 y las dimensiones externas correspondientes.

Esta turbina está diseñada para proporcionar una potencia de 6 kW a 600 revoluciones por minuto. La potencia nominal de 6 KW se alcanza a una velocidad de viento de 12 m/s. El frenado se producirá a una velocidad de viento de 14 m/s.

Figura N° 4.7
DIMENSIONES EXTERNAS DEL AEROGENERADOR
BORNAY 6000



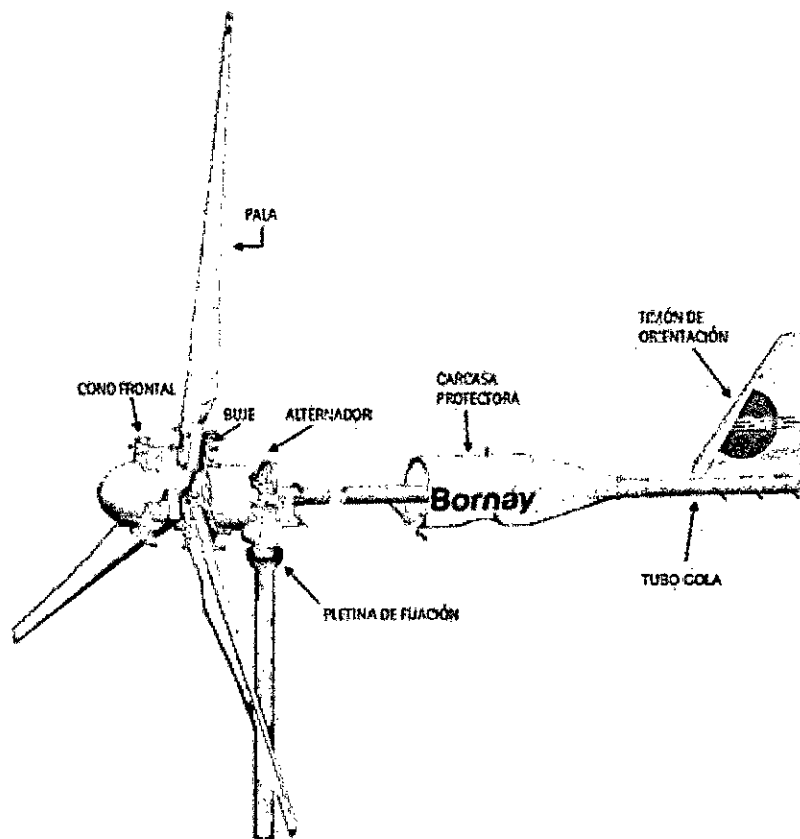
Fuente: Manual del generador Bornay 6000

En la Figura N° 4.8 se puede observar los componentes del aerogenerador Bornay 6000.

La potencia producida por el aerogenerador viene a ser la misma que la producida por la turbina, por lo que reescribimos la ecuación correspondiente que fue definida en el capítulo II, así:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4.15)$$

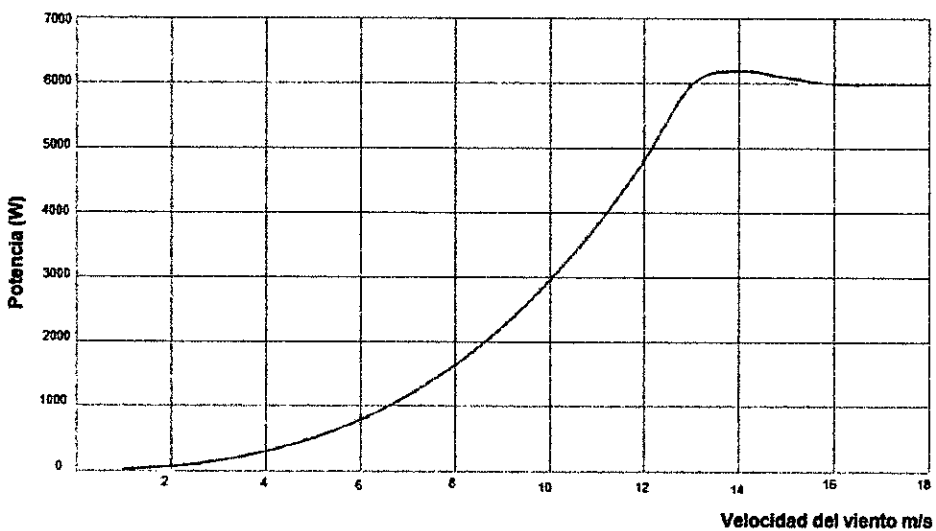
Figura N° 4.8
COMPONENTES DEL AEROGENERADOR
BORNAY 6000



Fuente: Manual del generador Bornay 6000

Considerando los datos de la turbina especificada en la Tabla N° 4.1, y considerando un rango de velocidad de 0 a 18 m/s, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 4.9.

Figura N° 4.9
POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE
VIENTO



Fuente: Elaboración propia

Los datos de algunos parámetros del generador son:

Voltaje nominal: 220 V

n_p : Número de polos = 4

R_s : Resistencia del esator = 2.875Ω

λ_{PM} : Enlace de flujo de los imanes = 0.175 Wb – vuelta

L_q : Inductancia del eje q = 8.5 mH

L_d : Inductancia del eje d = 8.5 mH

J : Inercia = 0.0008 Kg m²

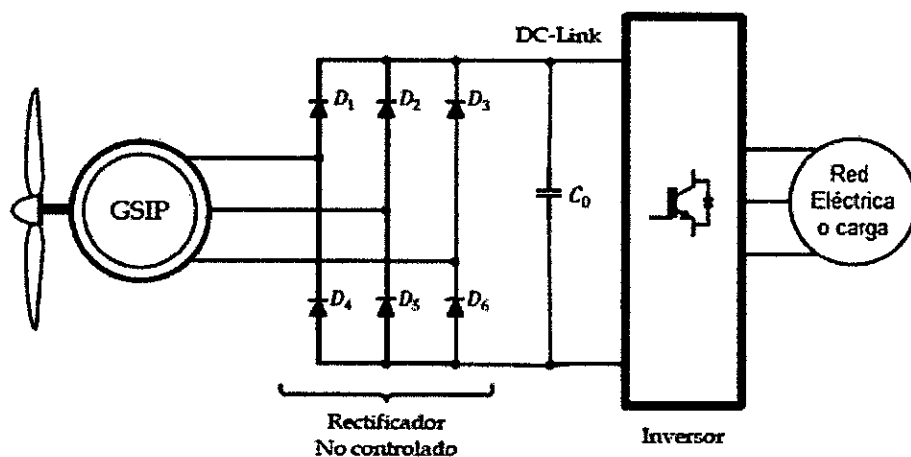
F : Coeficiente de fricción = 0.001 N.m.s

- **Diseño y simulación del convertidor AC/DC no controlado**

El rectificador trifásico no controlado es uno de los convertidores AC/DC más usados, debido a su simplicidad y bajo costo. Es justamente este esquema el que usamos en este trabajo de tesis. En la Figura N° 4.10 se muestra el esquema del convertidor AC/DC no controlado.

La función básica de este convertidor es rectificar la señal alterna en una tensión continua o constante, disponible para que la etapa inversora lo utilice, o en su defecto, como es nuestro caso, para que previamente lo utilice el convertidor Boost.

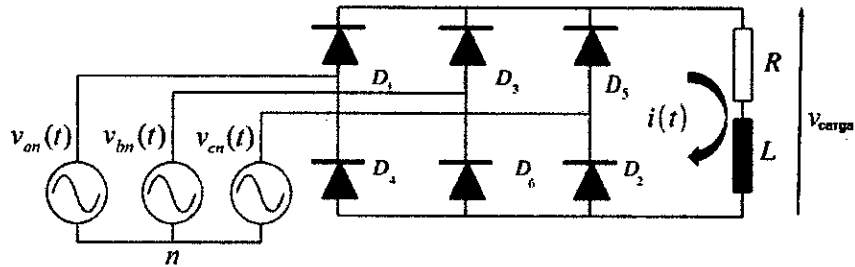
Figura N° 4.10
ESQUEMA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO



Fuente: Carranza O. [4]

En la Figura N° 4.11 se presenta el circuito específico de un puente rectificador de onda completa no controlado con carga RL.

Figura N° 4.11
PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO
NO CONTROLADO



Fuente: Bueno A. [2]

De acuerdo a [2], las ecuaciones de corriente y voltaje en un puente rectificador trifásico de onda completa no controlado, vienen dadas por:

- **Corriente en régimen permanente para $\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$:**

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left[\text{sen}(\omega t - \varphi) + \frac{\text{sen}(\varphi)}{1 - e^{-\frac{\pi/3}{\tan(\varphi)}}} e^{-\frac{(\omega t - \pi/3)}{\tan(\varphi)}} \right] \quad (4.16)$$

- **Tensión media:**

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[\int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) d\omega t \right] = \frac{3\sqrt{2}V_{\max}}{\pi} \approx 1.35V_{\max} \quad (4.17)$$

Considerando que la tensión de línea (V_L) es $\sqrt{3}$ veces la tensión de fase (V_F), es decir: $V_L = \sqrt{3}V_F$, entonces:

$$V_{\max} = \sqrt{2}V_F \quad \text{ó} \quad V_{\max} = \frac{\sqrt{2}V_L}{\sqrt{3}}$$

Por consiguiente, considerando que la tensión eficaz de fase del generador es de 220 V, entonces:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= \sqrt{2}V_F = \sqrt{2} \times 220V = 311V \\ \Rightarrow V_{dc} &= 1.35 \times 311V = 419.85V \end{aligned}$$

- **Corriente media:**

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (4.18)$$

Considerando $R = 10\Omega$, tendremos que:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{418.85V}{10\Omega} = 41.885 A$$

- **Tensión efectiva o eficaz:**

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (\sqrt{2} V_{max} \text{sen}(\omega t))^2 d\omega t} = \sqrt{2} V_{max} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \quad (4.19)$$

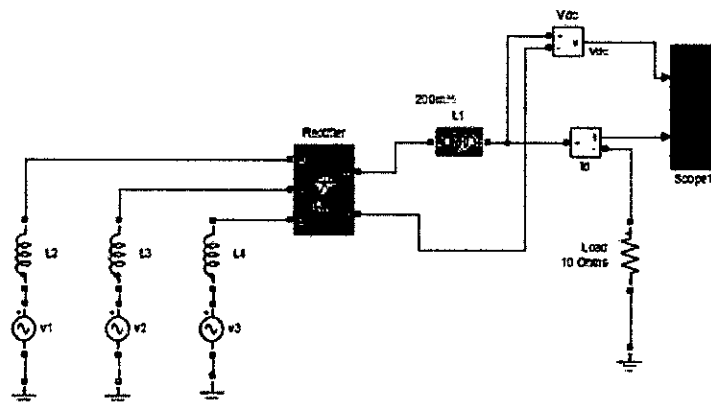
Para nuestro caso, la tensión eficaz en la carga, será:

$$V_{rms} = \sqrt{2} \times 311 \times \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} = 420.3672 V$$

En la Figura 4.12 se presenta el diagrama del rectificador trifásico en Simulink, y en la Figura 4.13 la respuesta gráfica de la tensión y la corriente rectificadas de salida.

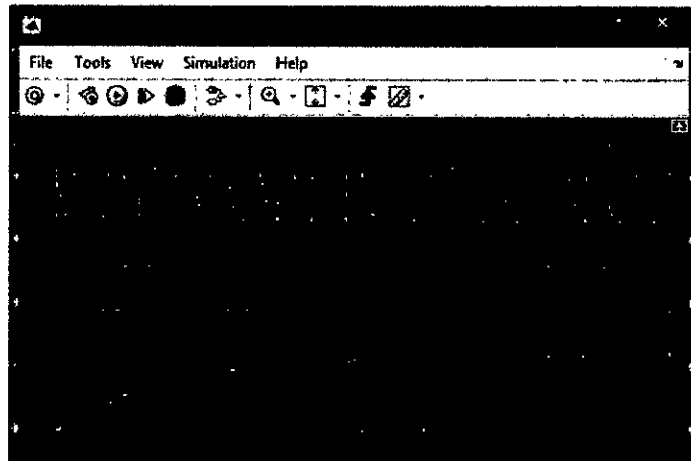
Figura N° 4.12

ESQUEMA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO EN SIMULINK



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4.13
RESPUESTA GRÁFICA DEL RECTIFICADOR
TRIFÁSICO NO CONTROLADO

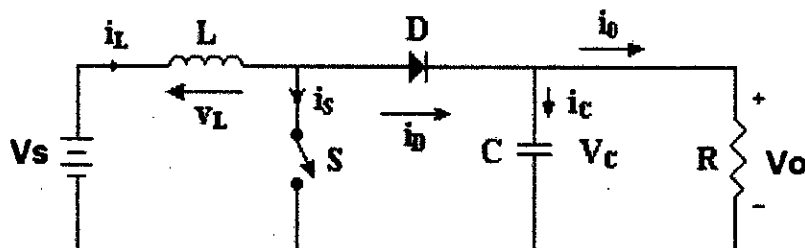


Fuente: Elaboración propia

- **Diseño, simulación y control MPPT y PID del convertidor DC/DC Boost**

En primera instancia veamos el diseño del convertidor Boost. En la Figura N° 4.14 se presenta un modelo genérico de un convertidor DC/DC Boost [7].

Figura N° 4.14
MODELO GENÉRICO DE UN CONVERTIDOR
DC/DC BOOST

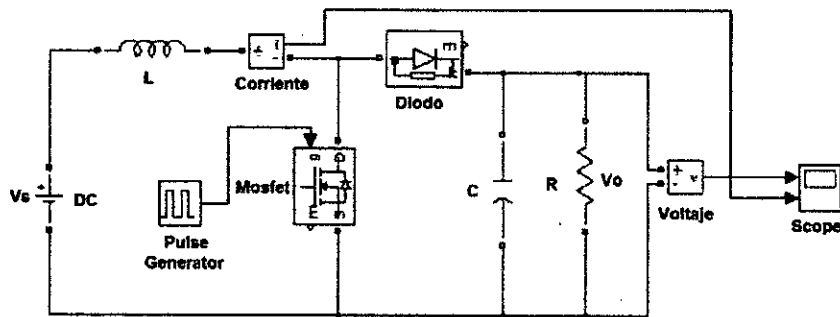


Fuente: Córdova S., Ospina S. [7]

Cuando el conmutador "S" se cierra (conducción), la energía proveniente de la fuente primaria (V_s) es conducida por el elemento de conmutación para ser almacenada en la bobina, no existiendo durante este intervalo ningún tipo de transferencia de energía a la carga. Cuando el conmutador "S" se abre, la tensión que se produce en bornes de la bobina se suma a la tensión de la fuente obteniéndose una tensión de salida superior a esta última y con idéntica polaridad. Al mismo tiempo, la energía almacenada previamente por la bobina es transferida a la carga.

Un esquema equivalente mostrado en la Figura N° 4.15 nos será de bastante utilidad para explicar el funcionamiento en conducción y corte.

Figura N° 4.15
MODELO ESPECÍFICO DE UN
CONVERTIDOR DC/DC BOOST



Fuente: Córdova S., Ospina S. [7]

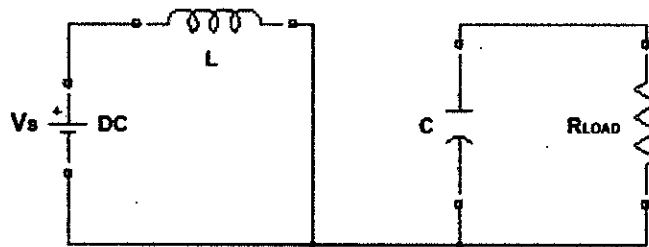
El voltaje de salida v_o expresado en función de su ciclo de trabajo, puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$v_o = \frac{v_s}{1-U} \quad (4.20)$$

Modo de operación: Régimen de C. C.

Conducción: En la Figura N° 4.16 se muestra el esquema del convertidor Boost en modo de conducción [29].

Figura N° 4.16
CONVERTIDOR BOOST EN
MODO DE CONDUCCIÓN



Fuente: Córdova S., Ospina S. [7]

Durante T_{on}

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_s}{L} \quad (4.21)$$

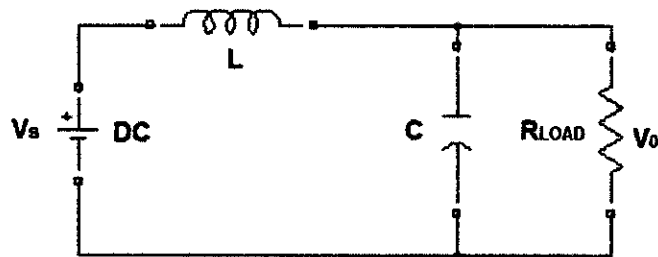
$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{v_o}{L} \quad (4.22)$$

Considerando que $T = \frac{1}{f}$ es el período de la señal portadora o período de conmutación, se define el ciclo de trabajo o duty cycle U como:

$$U = \frac{t_{on}}{T}, \quad 0 \leq U \leq 1 \quad (4.23)$$

No conducción: En la Figura N° 4.17 se muestra el esquema del convertidor Boost en modo de corte (abierto).

Figura N° 4.17
CONVERTIDOR BOOST EN
MODO DE CORTE



Fuente: Córdova S., Ospina S. [7]

Durante T_{off}

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_s - v_0}{L} \quad (4.24)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{v_0}{RC} \quad (4.25)$$

La inductancia mínima para el Boost está dada por la siguiente ecuación:

$$L_{min} = \frac{(1-U)^2 UR}{2f} \quad (4.26)$$

De forma análoga, el cálculo del valor mínimo del capacitor, está dada por:

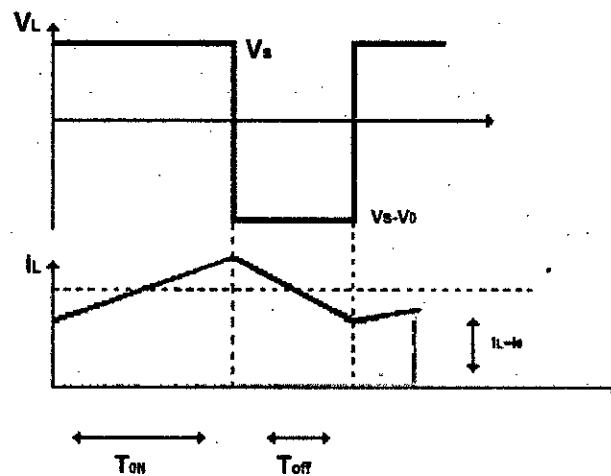
$$C_{min} = \frac{UV_o}{V_r R f} \quad (4.27)$$

La corriente permanente en la bobina viene dada por:

$$I_L = \frac{V_s}{(1-U)^2 R} \quad (4.28)$$

En la Figura N° 4.18 se muestra las gráficas de tensión e intensidad en la bobina, para régimen de corriente continua.

Figura N° 4.18
GRÁFICAS DE TENSIÓN E INTENSIDAD EN
LA BOBINA, PARA RÉGIMEN DE
CORRIENTE CONTINUA



Fuente: Carranza O. [4]

Parametrización de las ecuaciones

Consiste en representar el sistema de ecuaciones, en un único sistema bilineal. Para tal efecto, se define un parámetro $\mu(t)$ [7],

[11]:

$\mu(t) = 0$, para modo de corte.

$\mu(t) = 1$, para modo de conducción

Por lo que las ecuaciones (4.22) y (4.23) se reescriben así:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_s}{L} - \frac{v_0}{L} \mu(t) \quad (4.29)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{i_L}{C} \mu(t) - \frac{v_0}{RC} \quad (4.30)$$

Promediado

El método del promediado es interesante para simplificar las ecuaciones que rigen la dinámica del convertidor, de la siguiente forma:

$$\langle x(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau \quad (4.31)$$

Por lo que, a continuación se obtienen los valores promedios del voltaje y corriente, así:

$$\langle v_l(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v_l(\tau) d\tau \quad (4.32)$$

$$\langle i_c(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} i_c(\tau) d\tau \quad (4.33)$$

De las ecuaciones (4.31) y (4.32), se llega al resultado del sistema promediado siguiente [3]:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_s}{L} + \frac{\hat{v}_s}{L} - \frac{V_0}{L} \mu(t) + \frac{V_0}{L} u(t) \quad (4.34)$$

$$\frac{dV_0(t)}{dt} = \frac{i_L}{C} \mu(t) - \frac{i_L}{C} u(t) - \frac{V_0}{RC} \quad (4.35)$$

Considerando que $\mu(t)=1$, V_0 es el voltaje en la salida del convertidor, y considerando además que el problema de control se plantea asumiendo que las variables de interés poseen un valor constante y una parte fluctuante [3], podemos expresar dichas variables de estado así:

$$\begin{aligned} v_s &= V_s + \hat{v}_s(t) \\ v_0 &= V_0 + \hat{v}_0(t) \\ u &= U + \hat{u}(t) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Los valores en CD de las variables de estado pueden obtenerse a partir del modelo promedio, tomado la derivada igual a cero y despejando, se obtienen los valores promedio para la corriente y el voltaje de salida, así:

$$i_L = \frac{V_0}{R(1-U)}, \quad V_0 = \frac{V_s}{(1-U)}$$

Asimismo, eligiendo las siguientes variables de estado:

$$x_1 = i_L, \quad x_2 = V_0$$

Y en consecuencia, las ecuaciones de estado vienen a ser:

$$\dot{x}_1 = \frac{V_s}{L} + \frac{\hat{v}_s}{L} - \frac{x_2}{L} + \frac{x_2}{L} u \quad (4.37)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_1}{C} u - \frac{x_2}{RC} \quad (4.38)$$

Ahora podemos encontrar dos funciones de transferencia, una es la relación entre el voltaje de salida y el ciclo de trabajo, y la

otra es la relación entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada, así:

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-V_o}{(1-U)RC} \cdot \frac{s - \frac{R(1-U)^2}{L}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-U)^2}{LC}} \quad (4.39)$$

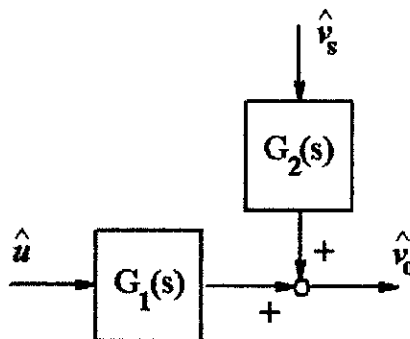
$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_s(s)} = (1-U) \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-U)^2}{LC}} \quad (4.40)$$

A manera de ejemplo, consideremos los siguientes parámetros del convertidor DC/DC Boost para un generador solar fotovoltaico:

$$V_s = 180; V_o = 240; f = 25000; R = 25; r = 0.01 \text{ (rizado)}$$

La respuesta del convertidor DC/DC Boost depende de dos entradas, una es el ciclo de servicio (U) y otra es dependiente de la tensión de entrada del Boost (v_s) y el ciclo de servicio (U), lo cual se puede visualizar en la Figura 4.19.

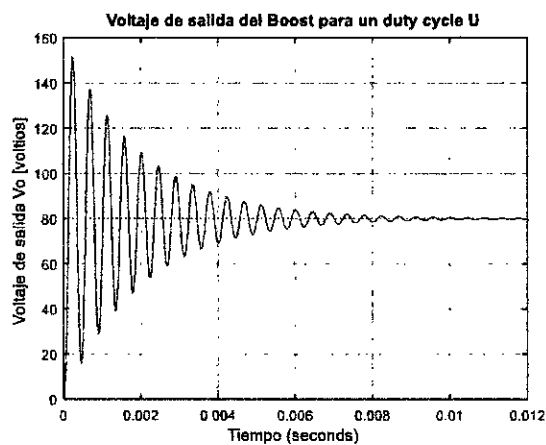
Figura N° 4.19
VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL CICLO DE TRABAJO Y DE LA TENSIÓN DE ENTRADA (PERTURBACIÓN)



Fuente: Campos D. [3]

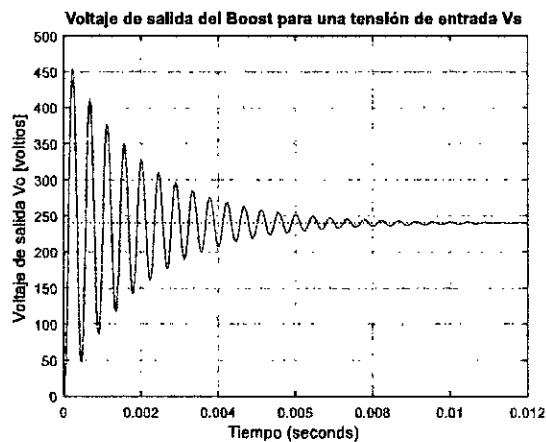
Los resultados gráficos correspondientes a la salida respecto a las dos entradas, se visualiza en la Figura N° 4.20 y Figura N° 4.21.

Figura N° 4.20
VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL
CICLO DE TRABAJO



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4.21
VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DE LAS
VARIACIONES DEL VOLTAJE DE ENTRADA



Fuente: Elaboración propia

Control MPPT y PID

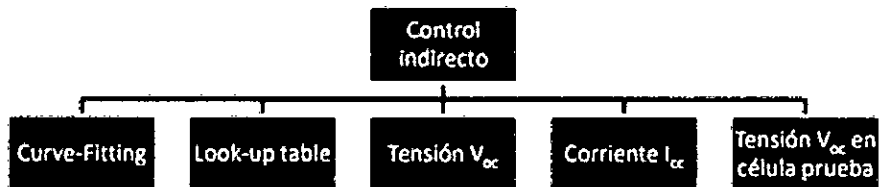
Maximum Power Point Trackers (MPPT)

Son algoritmos que se encargan de definir el punto de operación de los sistemas de control, de manera de maximizar la potencia de salida de los módulos fotovoltaicos y de los generadores eólicos.

En la Figura N° 4.22 se presenta una clasificación de algoritmos MPPT de control indirecto y en la Figura 4.20 algoritmos de control directo [28].

Figura N° 4.22

ALGORITMO MPPT DE CONTROL INDIRECTO



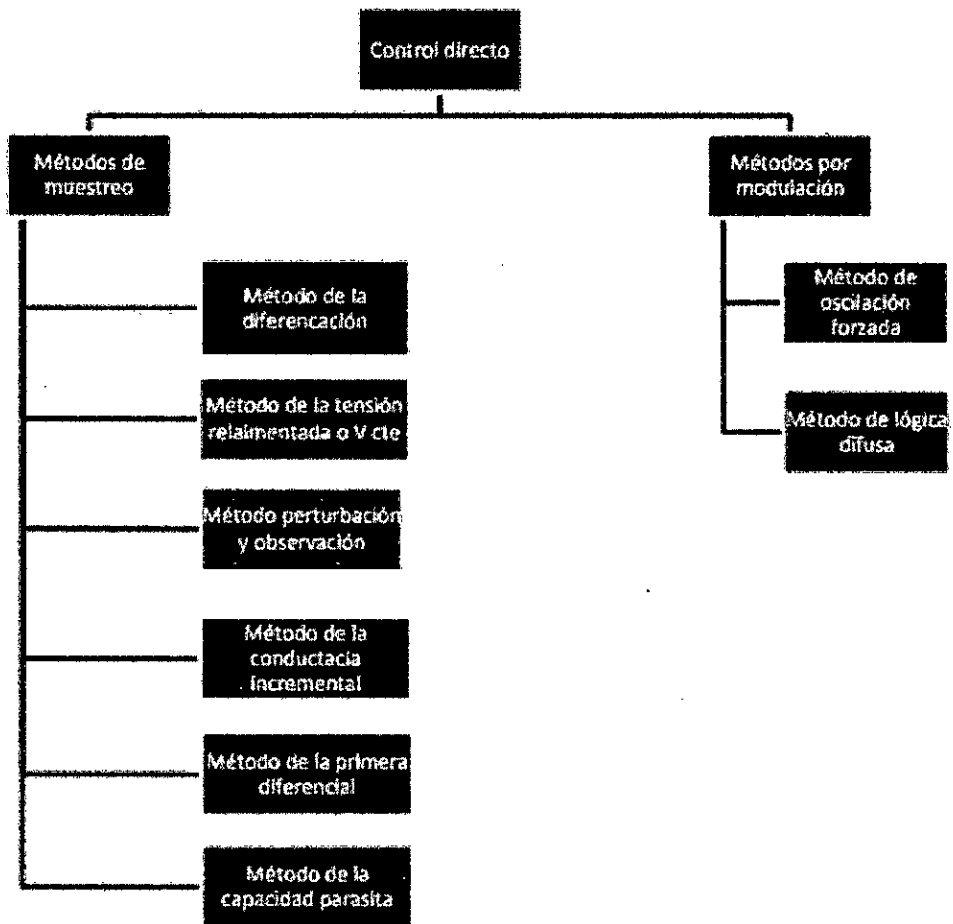
Fuente: Paredes V. [28]

Dentro del grupo de MPPT de control indirecto, los métodos más usados son los conocidos como Perturb and Observe e Incremental Conductance; pero dependiendo de los parámetros utilizados y variaciones en el cálculo de algoritmos, existen múltiples variaciones de estos mismos.

En nuestro caso trataremos sobre los algoritmos MPPT Perturb and Observe (P&O) y el Incremental Conductance (Conductancia incremental).

Figura N° 4.23

**ALGORITMO MPPT DE CONTROL
DIRECTO**



Fuente: Paredes V. [28]

Perturb and Observe (P & O)

Es el algoritmo más usado. Se basa en realizar pequeñas perturbaciones periódicas, aumentando o disminuyendo el voltaje de salida del sistema fotovoltaico o del generador eólico. Si debido a esta perturbación el valor de la potencia obtenida es mayor, la siguiente perturbación sigue la misma dirección; en caso contrario, se cambia la dirección de perturbación [21].

Una vez llegado al máximo punto de seguimiento (MPPT), el algoritmo aprovecha sus características para mantener el punto de operación oscilando alrededor del MPP. La reducción de la oscilación es posible si se disminuye el valor de las perturbaciones de voltaje, afectando negativamente a la búsqueda del MPP [28].

Las entradas necesarias para este algoritmo son el voltaje y la corriente instantáneos del panel solar fotovoltaico o del generador eólico. Entendiendo que el algoritmo es aplicable a cualquiera de los dos sistemas, de aquí en adelante consideraremos el panel solar fotovoltaico.

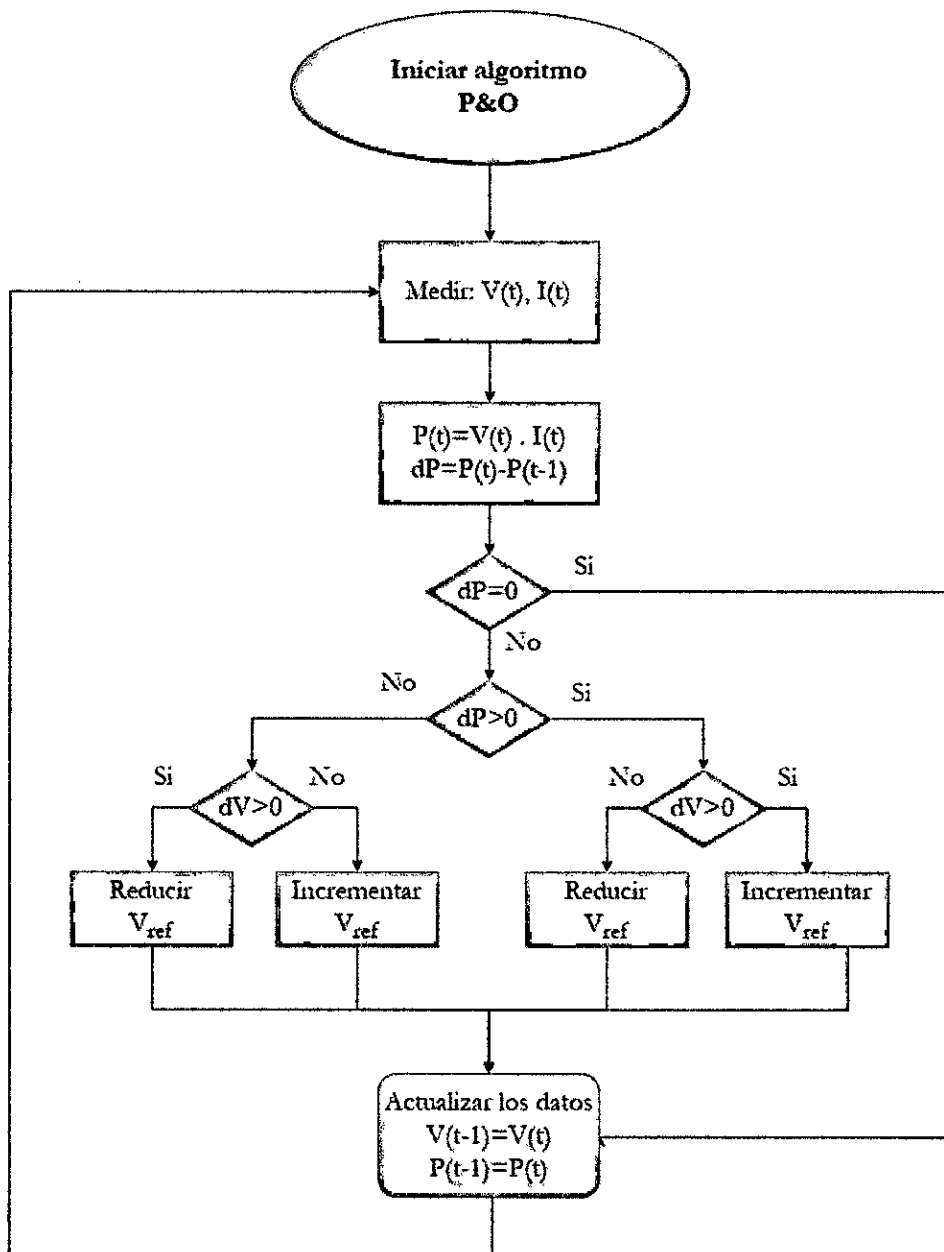
Este método se basa en la comparación de potencias. Para ello muestreamos las tensiones y en consecuencia la potencia para encontrar el MPP.

En la Figura N° 4.24 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo P&O clásico, de acuerdo a la variación del voltaje de referencia (V_{ref}).

Requisitos de implementación del algoritmo de Perturbación y Observación:

Para la utilización del algoritmo se requiere el uso de dos sensores, uno de tensión y otro de intensidad. De manera que a partir de ellos obtengamos la potencia.

Figura N° 4.24
DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO P&O
DE ACUERDO A LA VARIACIÓN DE V_{ref}



Fuente: Pérez F. [29]

Posibles casos:

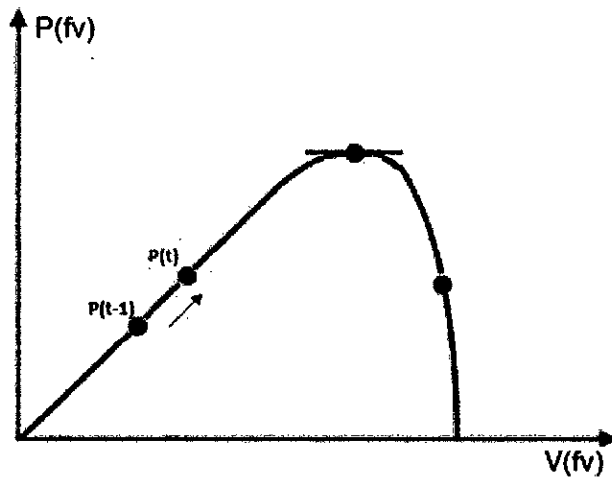
- $\Delta P > 0$ y $\Delta V > 0$:

En ese caso la variación de la potencia es mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

El incremento de tensión también es positivo, con lo que la acción de control será la de disminuir el ciclo de servicio D, de forma que aumente la tensión y alcancemos el punto de máxima potencia por la izquierda (ver Figura N° 4.25).

Figura N° 4.25

CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA IZQUIERDA



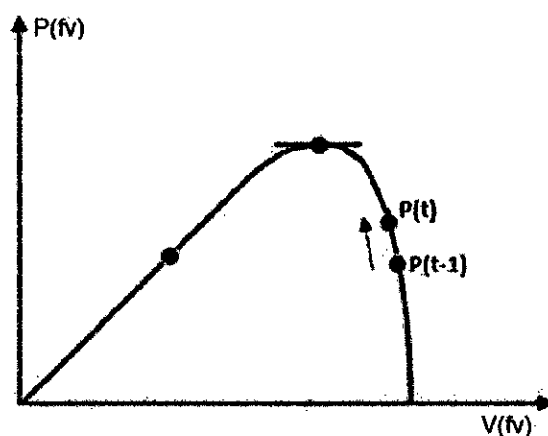
Fuente: Paredes V. [28]

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V < 0$:

En este caso la variación de la potencia sigue siendo mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

El incremento de tensión es negativo, con lo que la acción de control será la de aumentar el ciclo de trabajo D , de forma que disminuya la tensión de salida y alcancemos el punto de máxima potencia por la derecha (ver Figura 4.26).

Figura N° 4.26
CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA DERECHA



Fuente: Paredes V. [28]

- **$\Delta P > 0$ y $\Delta V = 0$:**

En este caso la variación de la potencia sigue siendo mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

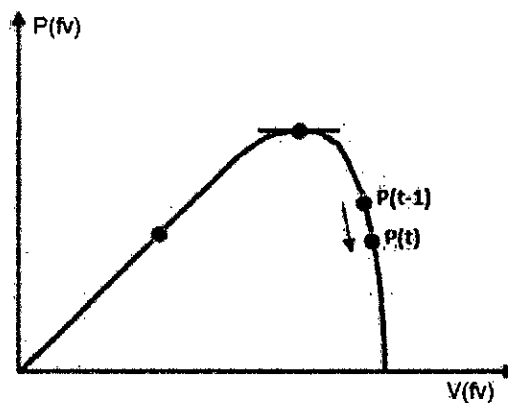
Al ser el incremento de la tensión nulo, significa que nos encontramos en el punto de máxima potencia, con lo que la acción de control será la de mantener el ciclo de servicio constante.

- **$\Delta P < 0$ y $\Delta V > 0$:**

En este caso la variación de potencia es menor que 0, indica que en la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

El incremento de tensión es positivo, con lo que la acción de control será la de aumentar el ciclo de servicio D, de esta manera la tensión disminuirá hasta que alcancemos el punto de máxima potencia por la derecha (ver Figura N° 4.27).

Figura N° 4.27
CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA DERECHA, ALEJÁNDONOS



Fuente: Paredes V. [28]

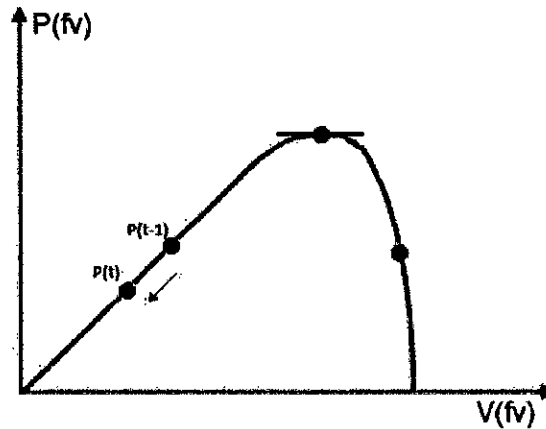
- $\Delta P < 0$ y $\Delta V < 0$:

En este caso la variación de potencia es menor que 0, indica que la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

El incremento de la tensión es negativo, con lo que la acción de control será la de disminuir el ciclo de servicio D, de manera que aumente la tensión y acercarnos al punto de máxima potencia por la izquierda (ver Figura N° 4.28).

Figura N° 4.28

**CURVA P-V: SE ALCANZA EL MPP POR LA
IZQUIERDA, ALEJÁNDONOS**



Fuente: Paredes V. [28]

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V = 0$:

En este caso la variación de potencia es menor que 0, indica que la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

Al ser el incremento de la tensión nulo, significa que nos encontramos en el punto de máxima potencia, con lo que la acción de control será la de mantener el ciclo de servicio constante.

Conductancia Incremental

Este método se basa en el cálculo de la conductancia y el estudio de su derivada para realizar la búsqueda del MPP. Con este método evitamos introducir perturbaciones como en el método P&O.

Análisis del algoritmo:

La potencia está dada por el producto de la tensión y la corriente sensadas, así:

$$P = V I \quad (4.41)$$

La derivada de la potencia en el punto de máxima potencia es nula:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (4.42)$$

En la parte izquierda de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (4.43)$$

En la parte derecha de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad (4.44)$$

De la ecuación (4.41) sabemos que la potencia es igual $P = V \cdot I$, entonces tenemos que:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \\ \Rightarrow \frac{dI}{dV} &= -\frac{1}{V} \end{aligned} \quad (4.45)$$

El término: $\frac{dI}{dV}$ representa el incremento de la conductancia o cambio instantáneo.

Mientras el término: $\frac{I}{V}$ representa la conductancia en un instante de tiempo.

Para definir el algoritmo necesitamos realizar las comparaciones siguientes:

- En el punto de máxima potencia (MPP):

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{1}{V} \quad (4.46)$$

- En la parte izquierda de la curva P-V

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{1}{V} \quad (4.47)$$

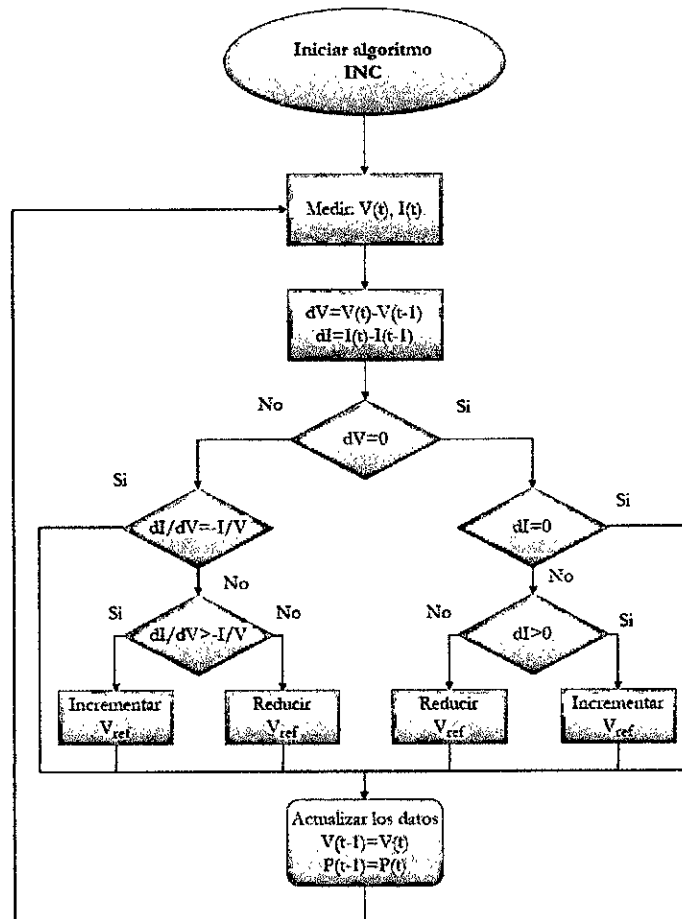
- En la parte derecha de la curva P-V

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{1}{V} \quad (4.48)$$

Al realizar esta comparación, mediante mediciones de tensión e intensidad, podemos determinar en qué posición de la curva nos encontramos respecto al punto de máxima potencia del panel (MPP).

En la Figura 4.29 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de Conductancia incremental.

Figura N° 4.29
DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO
DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL



Fuente: Pérez F. [29]

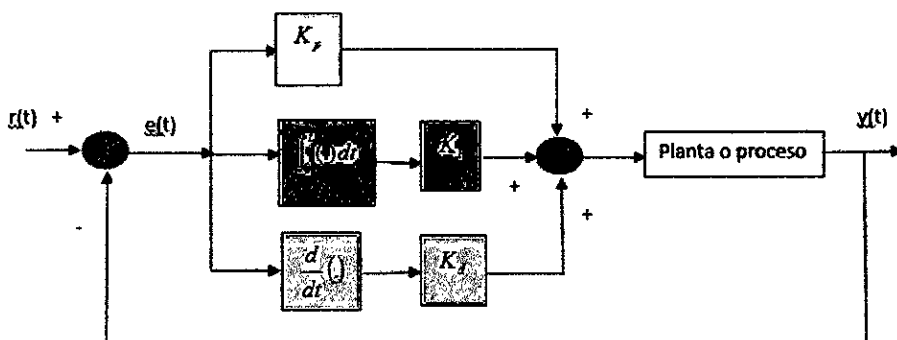
Control Proporcional Integral Derivativo PID

El algoritmo del controlador PID bastante difundido en la comunidad universitaria, viene dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.49)$$

donde es la señal de error, $u(t)$ es la señal o fuerza de control, $y(t)$ es la salida controlada del proceso o planta, $r(t)$ es la señal de referencia deseada o "set-point", K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral, y T_d es la constante de tiempo derivativo. El algoritmo dado en la ecuación (4.49) se denomina también algoritmo ISA (Instrument Society of America) o algoritmo PID no interactuante (ver Figura N° 4.30).

Figura N° 4.30
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL
CONTROLADOR PID



Fuente: elaboración propia

La ecuación (4.49) también puede escribirse de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.50)$$

La configuración básica del algoritmo PID mostrado en la ecuación (4.49) se puede modificar introduciendo ciertas características con la finalidad de que su rendimiento mejore sustancialmente. Por ejemplo, no podemos evitar que puedan ocurrir cambios bruscos del error $e(t)$, los cuales pueden hacer incrementar el término derivativo:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{d(r(t) - y(t))}{dt} \quad (4.51)$$

y su efecto se puede apaciguar si es que utilizamos como señal de entrada únicamente la señal realimentada $y(t)$ en lugar de $e(t)$. De esta forma, la ecuación (4.49) se convierte en:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt - K_p T_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (4.52)$$

Aplicando Laplace a la ecuación (4.52), se obtiene:

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{s} E(s) - K_p T_d s Y(s) \quad (4.53)$$

Otra modificación importante es filtrar la acción derivativa del controlador PID original mediante un filtro de primer (o segundo) orden para disminuir el ruido derivativo. Esta característica limita la amplificación del ruido de medición de alta frecuencia en la salida del controlador. La señal de control será así menos ruidosa y la ganancia en alta frecuencia permanecerá dentro de cotas apropiadas. Un término derivativo práctico, ya que un derivador puro no puede realizarse exactamente, puede aproximarse por un sistema de primer orden con una constante de tiempo T_f que a menudo se normaliza con respecto al tiempo derivativo T_d . Por consiguiente, el término derivativo del algoritmo PID (ecuación

(4.53)) se modifica: $K_d s$ por $\frac{K_d s}{1 + T_f s}$, siendo $T_f = \frac{T_d}{N}$

La discretización del algoritmo de Control PID modificado, considerando la representación trapezoidal para la componente integral, se escribe así:

$$u(k) = P(k) + I(k) + D(k) \quad (4.54)$$

Siendo:

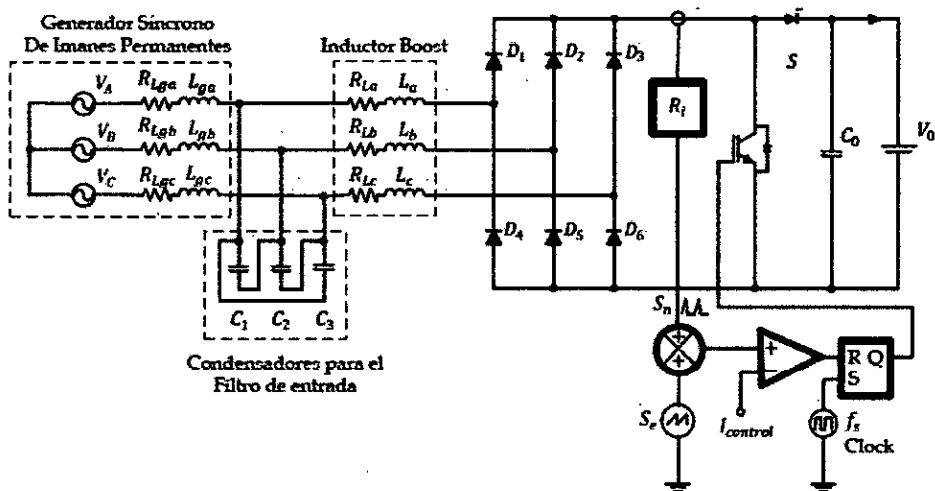
$$P(k) = K_p e(k), \quad I(k) = I(k-1) + \frac{K_i T}{2} [e(k) + e(k-1)]$$

$$D(k) = \frac{T_d}{(NT + T_d)} \left\{ D(k-1) - K_p N [y(k) - y(k-1)] \right\}$$

Un diagrama de bloques considerando al convertidor DC/DC Boost, conectado a la izquierda por el Puente Rectificador Trifásico No Controlado + Generador Síncrono de Imanes Permanentes, se muestra en la Figura N° 4.31.

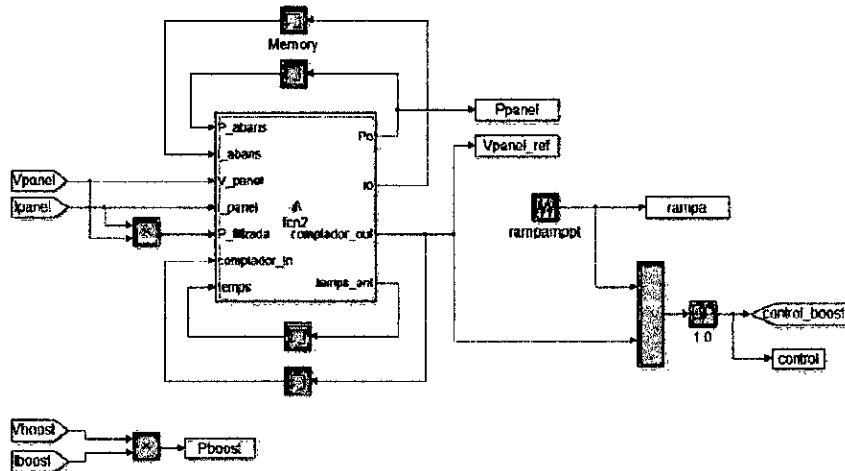
Figura N° 4.31

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONVERTIDOR DC/DC BOOST EN CONJUNTO CON EL GSIP Y EL PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO



Fuente: Carranza O. [4]

Figura N° 4.33
BLOQUE DE CONTROL MPPT



Fuente: elaboración propia

Las siguientes líneas corresponden a un pequeño programa en código Matlab utilizado para la implementación del sfunction del MPPT:

```

% mppt_boost.m
function [Po,Io,comptador_out,temps_ant] =
fcn2(P_abans,I_abans,V_panel,I_panel,P_filtrada,comptador_in
,temps,stepsimulation)
temps_ant=temps+1;
interval=1e-3;
avalua=temps_ant*stepsimulation;
if (avalua==interval)
if (I_panel<I_abans && P_filtrada<P_abans) ||
(I_panel>I_abans && P_filtrada>P_abans)
comptador_out=comptador_in-.5;
else
comptador_out=comptador_in+.5;
end
if comptador_out>990 comptador_out=990;
end
    if comptador_out<10 comptador_out=10;
    end
Po=P_filtrada;
Io=I_panel;
temps_ant=0;
else
Po=P_abans;
Io=I_abans;
comptador_out=comptador_in;

```

end

Los datos necesarios para el bloque MPPT son los siguientes:

$$P_{panel} = 90W$$

$$V_{panel} = 18.1V$$

$$I_{panel} = 4.98A$$

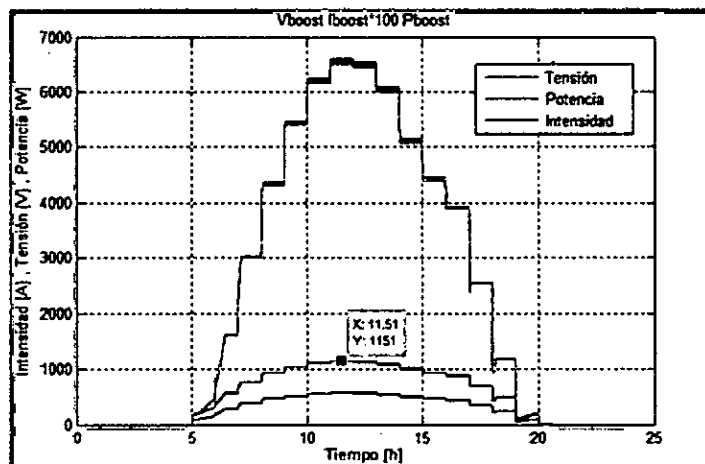
$$T = 25^{\circ}C$$

En este algoritmo, la salida solo puede tomar dos valores, incrementar o decrementar. Lo más trabajoso es determinar experimentalmente los tiempos que corresponden desplazarse en un sentido u otro para cualquiera de los dos ejes, y lo menos dificultoso es determinar dichos tiempos cuando el panel está fijo (estático); pero con variaciones de la intensidad de la radiación solar.

En la Figura N° 4.34 se observa la respuesta en potencia, intensidad y tensión de salida del convertidor DC/DC Boost.

Figura N° 4.34

RESPUESTA EN POTENCIA, INTENSIDAD Y TENSIÓN DE CONTROL MPPT



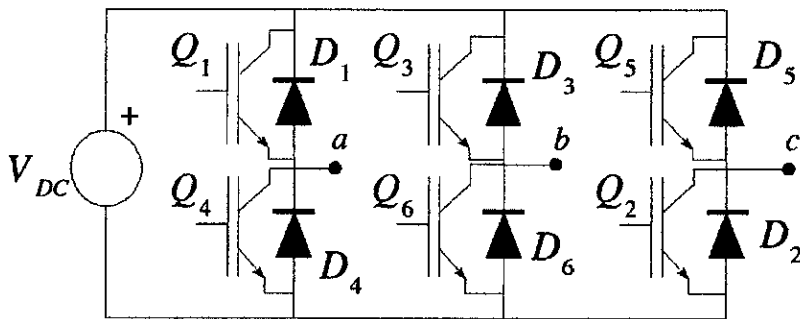
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Figura N° 4.34, la tensión de salida del Boost es de 1151 V en su punto más elevado. La tensión de entrada del Boost es aproximadamente 180 V, lo que indica que la salida corresponde a 6 veces la entrada.

- **Diseño, simulación y control SVPWM del inversor trifásico**
Habiendo tratado sobre la modulación SVPWM, a continuación trataremos sobre el inversor trifásico, cuyo esquema se puede apreciar en la Figura N° 4.35.

Figura N° 4.35

INVERSOR TRIFÁSICO



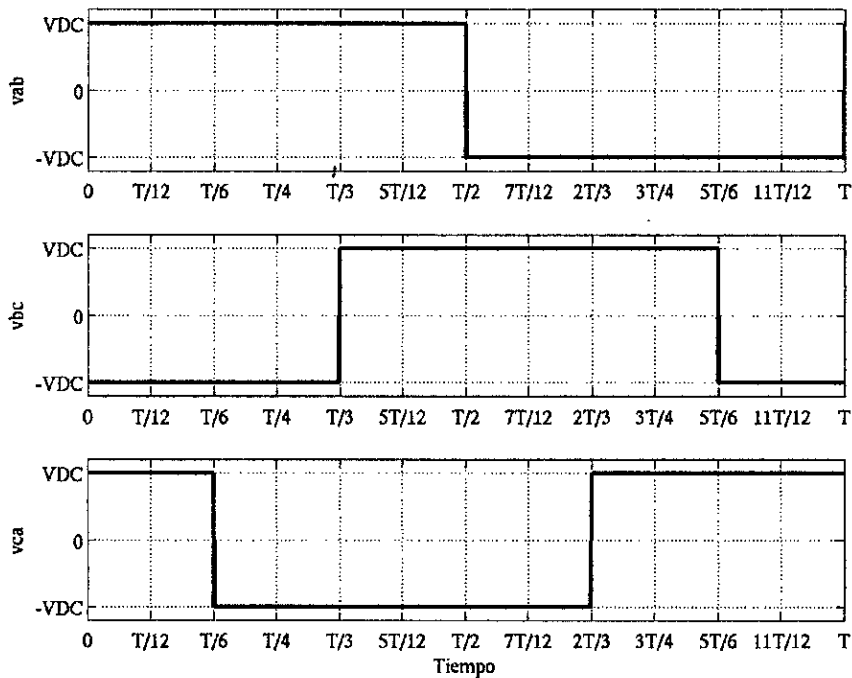
Fuente: Bueno A. [2]

El sistema trifásico generado a partir de la fuente de corriente continua debe cumplir las siguientes condiciones [2]:

- La tensiones en las tres fases deben poseer igual módulo
- Debe existir un desfase de $2\pi/3$ entre las fases
- El sistema de tensiones debe tener una secuencia (a, b, c) o (a, c, b).
- La suma de las tensiones en cada instante de tiempo debe ser cero $v_{ab}(t) + v_{bc}(t) + v_{ca}(t) = 0$

En la figura N° 4.36, se presenta un posible sistema de tensiones trifásicas generadas por el inversor. Analizando este sistema de tensiones, se puede evidenciar que cumple las tres primeras condiciones pero la sumatoria de tensiones línea a línea instantánea es diferente de cero.

Figura N° 4.36
SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICA



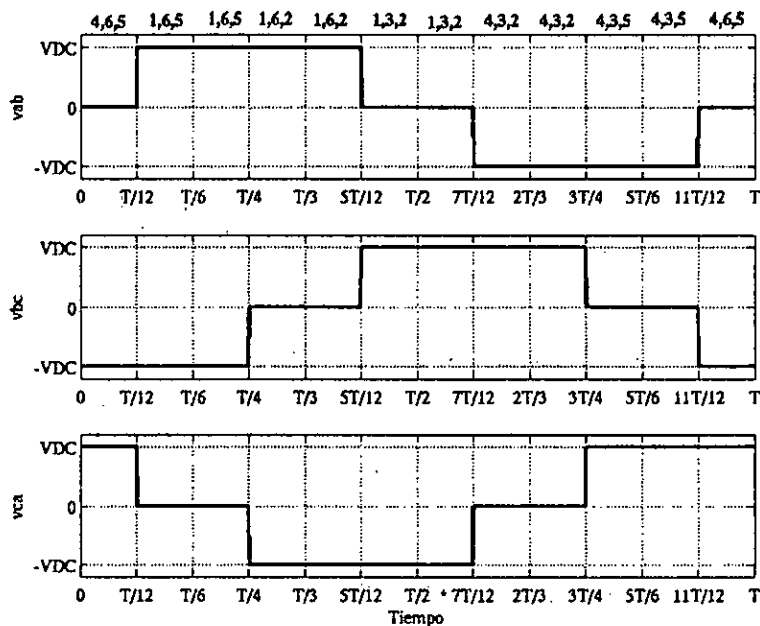
Fuente: elaboración propia

La secuencia de disparo de los IGBT o mosfets para generar el sistema trifásico de la Figura N° 4.36, se requiere la operación simultánea de los dos componentes pertenecientes a la misma rama, esto ocasionaría un cortocircuito en la fuente de corriente continua, razón por la cual esta forma de onda no puede ser generada por este puente convertidor.

En tal sentido, para cumplir la condición que la sumatoria instantánea de tensiones entre las fases sea igual a cero, las formas de onda generadas por el puente inversor no pueden poseer tercer armónico (secuencia 0). Esta condición garantiza que no exista operación simultánea de dos interruptores de la misma rama, por lo que en la figura N° 4.37, se presenta un sistema de tensiones trifásica sin tercer armónico, con su respectiva secuencia de disparo para su generación en un inversor trifásico.

Figura N° 4.37

SISTEMA DE TENSIONES TRIFÁSICA SIN PRESENCIA DE TERCER ARMÓNICO



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.38, se presenta el contenido armónico de la tensión "v_{ab}" para las formas de onda de las figuras 4.37 y 4.38. Se puede apreciar la ausencia de terceros armónicos y sus múltiplos en el contenido armónico de las dos ondas correspondientes a la Figura N° 4.37.

Para $n=3$ y sus múltiplos, los coeficientes de la serie son iguales a cero.

Tensión eficaz

Las tensiones eficaces de línea a línea son:

$$V_L(RMS) = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_{DC}^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC} = 0.8165 V_{DC} \quad (4.58)$$

De la ecuación (4.55) obtenemos que la n -ésima componente de la tensión eficaz de línea es:

$$V_{Ln}(RMS) = \frac{4V_{DC}}{\sqrt{2}n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (4.59)$$

Por consiguiente, para $n=1$, tendremos la tensión eficaz de línea del fundamental:

$$V_{L1}(RMS) = \frac{4V_{DC}}{\sqrt{2}\pi} \cos 30^\circ = 0.7797 \quad (4.60)$$

El valor eficaz de la tensión de fase viene dado por la tensión de línea:

$$V_F(RMS) = \frac{V_L(RMS)}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}V_{DC}}{3} = 0.4714V_{DC} \quad (4.61)$$

Factor de distorsión armónica total

El factor de distorsión armónica total en tensión es:

$$THD = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{msl}^2}}{V_{msl}} = 0.31084 \quad (4.62)$$

De acuerdo a lo tratado en el Capítulo II, subsección 2.2.3, se puede obtener el vector espacial de tensión aplicado por el inversor en función del estado del interruptor de cada fase como:

$$\vec{v}_{fn} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[Sw_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} Sw_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} Sw_c \right] \quad (4.63)$$

En la Tabla N° 4.2 se presentan los vectores espaciales de tensiones obtenidos con el inversor trifásico para cada una de las posibles combinaciones de los interruptores de la Figura N° 4.36.

Tabla N° 4.2
CONTENIDO DE ARMÓNICA DEL SISTEMA DE
TENSIONES TRIFÁSICAS CON O SIN TERCER
ARMÓNICO

Sw_a	Sw_b	Sw_c	\vec{v}_{fn}
0	0	0	0
0	0	1	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC} e^{j\frac{\pi}{3}}$
0	1	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC} e^{-j\frac{\pi}{3}}$
0	1	1	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$
1	0	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$
1	0	1	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC} e^{-j\frac{\pi}{3}}$
1	1	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC} e^{j\frac{\pi}{3}}$
1	1	1	0

Fuente: elaboración propia

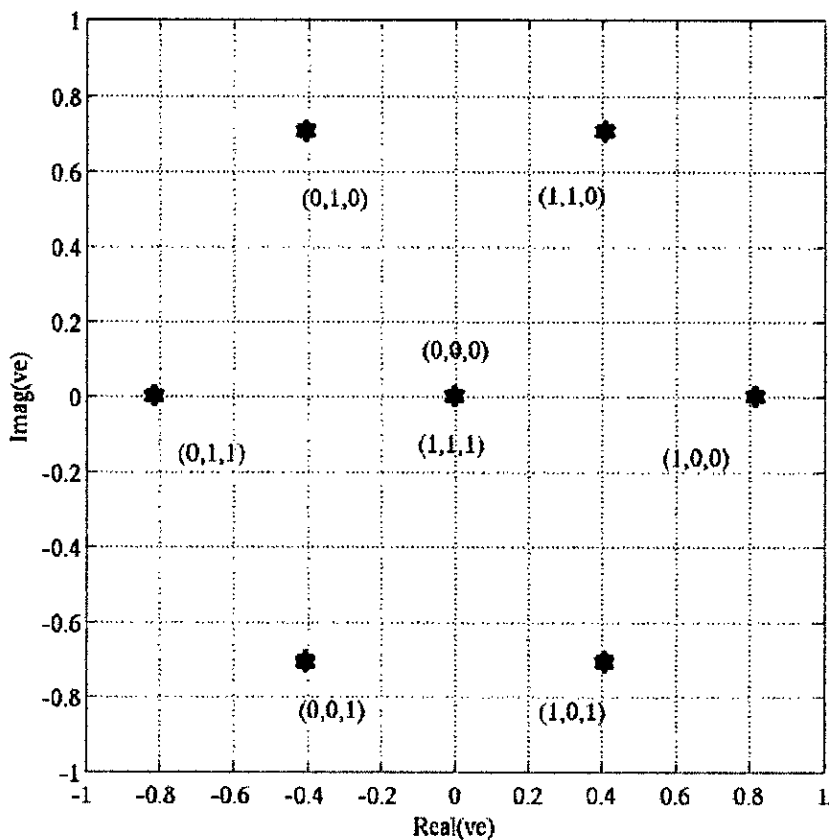
En la Figura N° 4.39 se puede apreciar el vector espacial de tensiones que aplica el inversor a la carga.

Por consiguiente, se puede calcular la tensión de fase a neutro aplicada por el inversor a la carga, a partir del vector espacial como:

$$R\left(\vec{v}_{fn}\right)=\sqrt{\frac{2}{3}}\left[v_a(t)-\frac{1}{2}\left(v_b(t)+v_c(t)\right)\right] \quad (4.64)$$

Figura N° 4.39

TENSIÓN ESPACIAL DEL INVERSOR TRIFÁSICO



Fuente: Bueno A. [2]

Debido a que en realidad el sistema no tiene neutro conectado, se tiene que:

$$v_a(t)+v_b(t)+v_c(t)=0 \Rightarrow v_a(t)=-\left(v_b(t)+v_c(t)\right) \quad (4.65)$$

Reemplazando la ecuación (4.65) en (4.64) se obtiene:

$$v_a(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} R_e \left(\vec{v}_{fn} \right) \quad (4.66)$$

Análogamente obtendremos:

$$\vec{v}_{fn} e^{j\frac{4\pi}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[e^{j\frac{4\pi}{3}} + 1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} \right] \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}$$

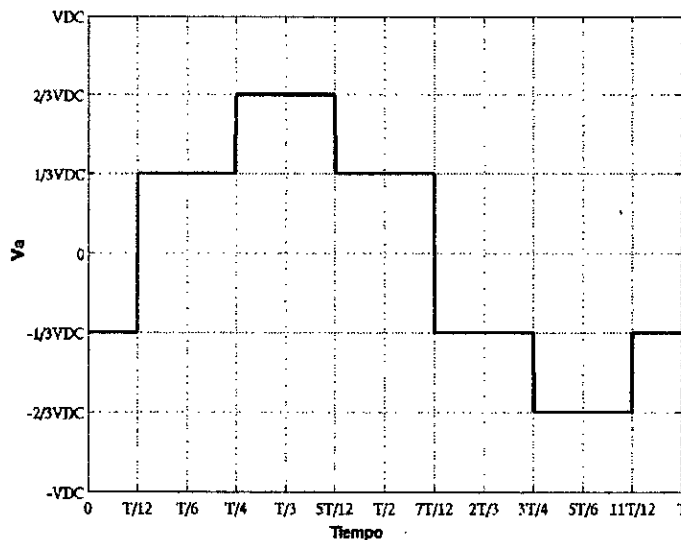
$$v_b(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} R_e \left(\vec{v}_{fn} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (4.67)$$

Finalmente, de la ecuación (4.65) se obtiene el valor de $v_c(t)$ como:

$$v_c(t) = -(v_a(t) + v_b(t)) \quad (4.68)$$

En la Figura N° 4.40 se presenta la tensión fase a neutro generada por el inversor para la opción de conmutación mostradas en la Figura N° 4.37.

Figura N° 4.40
TENSIÓN DE FASE A NEUTRO DEL INVERSOR
TRIFÁSICO



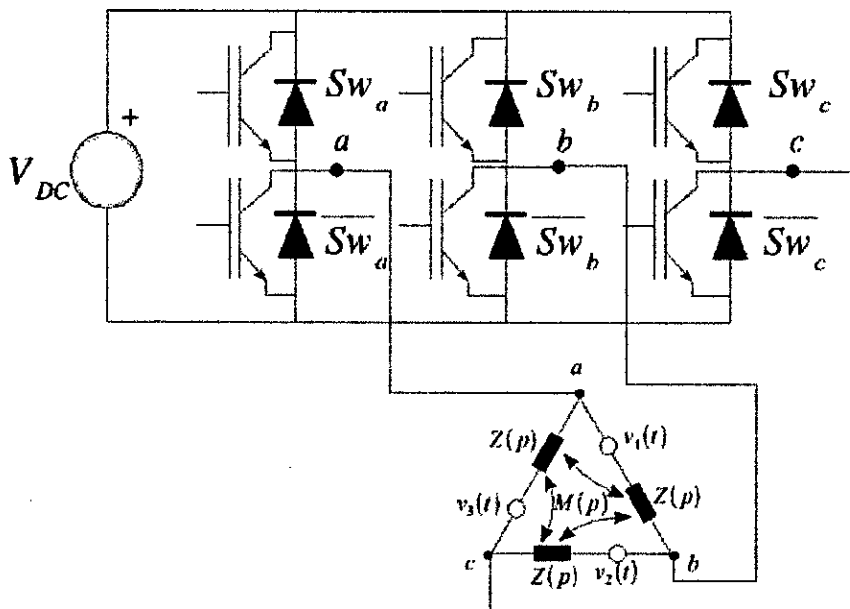
Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.40 observamos que la salida es una forma de onda no senoidal, en tal sentido se necesita conectar filtros que suavicen la tensión de salida y produzcan una señal de salida senoidal.

Asimismo, tenemos que considerar que tipo de carga tendremos conectado a la salida del inversor trifásico. Esta puede ser una carga trifásica resistiva pura (pasiva) o puede ser una carga activa (R-L, R-C, R-L-C).

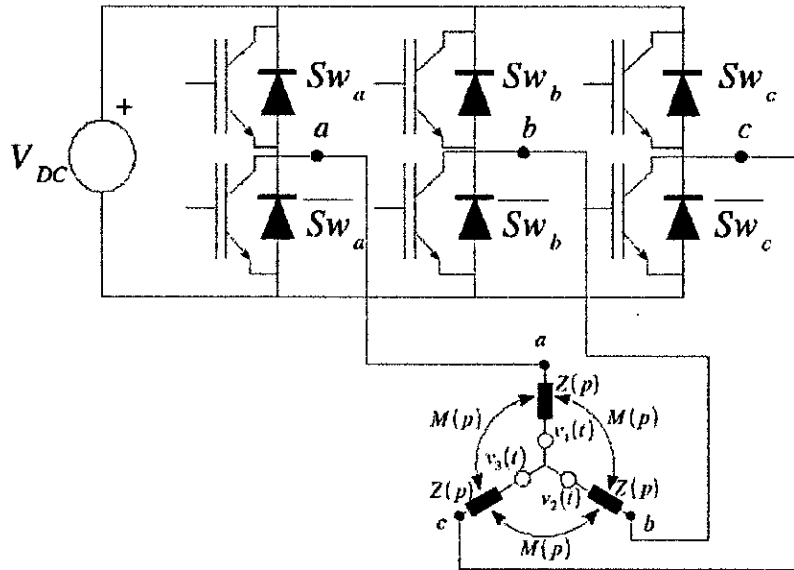
En la Figura N° 4.41 se presenta el inversor conectado a una carga trifásica Δ , que puede ser activa o pasiva, y en la Figura N° 4.42 se presenta el inversor Y con carga activa o pasiva.

Figura N° 4.41
INVERSOR CON CARGA "DELTA" ACTIVA O PASIVA



Fuente: Bueno A. [2]

Figura N° 4.42
INVERSOR CON CARGA “Y” ACTIVA O PASIVA



Fuente: Bueno A. [2]

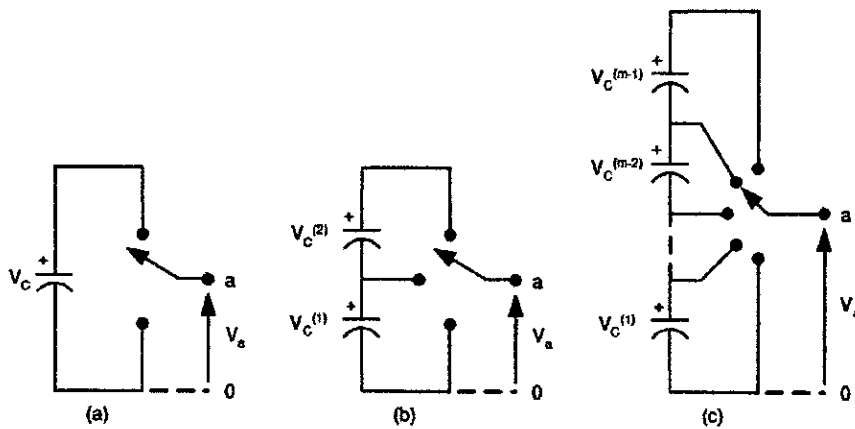
Una opción alternativa para obtener mejoras en la respuesta del inversor, es utilizar inversores multinivel.

Inversores multinivel

La función general de un Inversor Multinivel es generar un voltaje alterno a partir de diferentes niveles de voltaje continuo [19]. Estos inversores multinivel pueden ser conectados en serie (con fuentes DC flotantes galvánicamente aisladas) o en paralelo (con fuente DC común y galvánicamente aislados con transformadores de potencia en la carga) [1].

Un inversor de dos niveles genera dos niveles de voltaje en la salida, un inversor de tres niveles genera tres niveles de voltaje en la salida, y así sucesivamente, tal como puede apreciarse en la Figura N° 4.43.

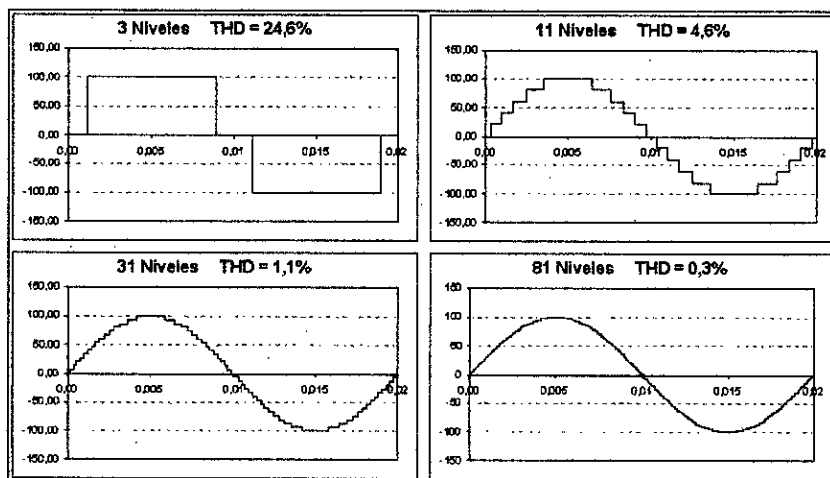
Figura N° 4.43
INVERSOR DE (a) 2 NIVELES, (b) 3 NIVELES, (c) M
NIVELES



Fuente: Bretón A. [1]

En la Figura N° 4.44 se muestra la señal obtenida con distintos números de niveles de tensión de salida.

Figura N° 4.44
NÚMERO DE NIVELES Y SU DISTORSIÓN
ARMÓNICA



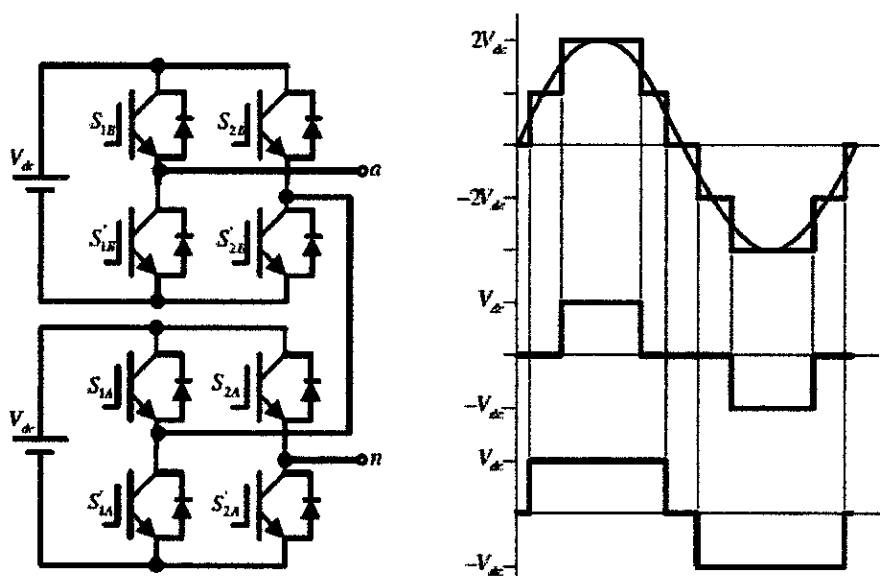
Fuente: Bretón A. [1]

Entre las ventajas que podemos encontrar en los inversores multinivel son:

- Pueden generar voltajes de salida con distorsión extremadamente pequeña.
- Las corrientes de salida son de muy baja distorsión.
- Pueden operar con baja frecuencia de conmutación

Por ejemplo en la Figura N° 4.45 se muestra el diagrama de conexión para un inversor en cascada simétrico de dos etapas. Este inversor puede generar voltajes de salida que van desde $-2V_{dc}$ a $+2V_{dc}$ con cinco niveles diferentes (dos en el semiciclo positivo, dos en el semiciclo negativo y el cero, con escalones iguales a V_{dc}). Para conseguir los diferentes niveles de tensión se debe utilizar la secuencia de conmutación que se muestra en la Tabla N° 4.3.

Figura N° 4.45
INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO DE DOS ETAPAS



Fuente: Bretón A. [1]

Tabla N° 4.3
SECUENCIA DE ENCENDIDO PARA EL INVERSOR
DE LA FIGURA N° 4.46

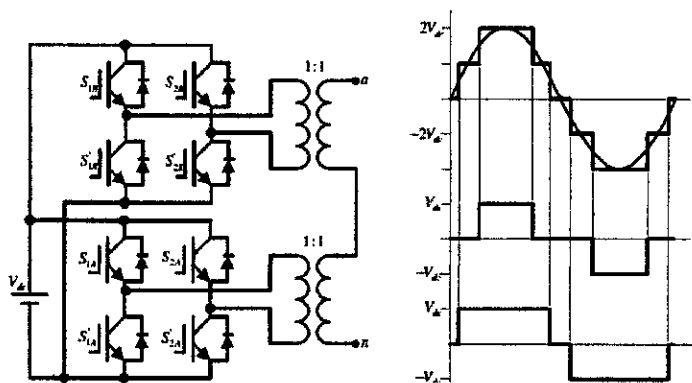
V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S_{1A}	S_{2A}	S_{1B}	S_{2B}	S_{1B}	S_{2B}
0	1	1			1	1		
V_{dc}	1			1	1	1		
$2 V_{dc}$	1			1	1			1
V_{dc}	1			1			1	1
0			1	1			1	1
$-V_{dc}$		1	1				1	1
$-2 V_{dc}$		1	1			1	1	
$-V_{dc}$		1	1		1	1		

Fuente: Bretón A. [1]

Inversor multietapa en Cascada con Fuente Común

Utilizando un esquema similar al del inversor con fuentes independientes, pero poniendo transformadores en la salida, se puede construir un Inversor Multietapa con Fuente Común. En la Figura N° 4.46 se puede observar el diagrama de un inversor de este tipo de dos etapas.

Figura N° 4.46
INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO DE DOS
ETAPAS CON FUENTE COMÚN



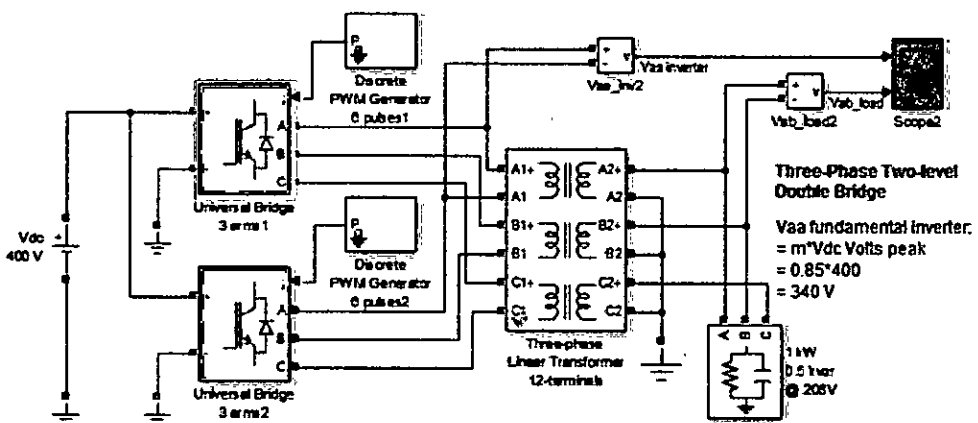
Fuente: Bretón A. [1]

Como puede observarse, a diferencia del inversor con fuentes independientes, ambos puentes están alimentados desde una misma fuente DC, y además los transformadores utilizados poseen la misma razón de transformación. Este inversor sería equivalente al Inversor Multietapa en Cascada con Fuentes Independientes y Simétrico y por lo tanto, es capaz de generar cinco niveles de tensión (dos positivos, dos negativos y el cero).

Para generar estos niveles de tensión se debe utilizar la misma secuencia de combinación que la mostrada en la tabla 4.3.

Basándonos en este tipo de configuración es que se ha efectuado un programa en Simulink, tal como puede apreciarse en la Figura N° 4.47.

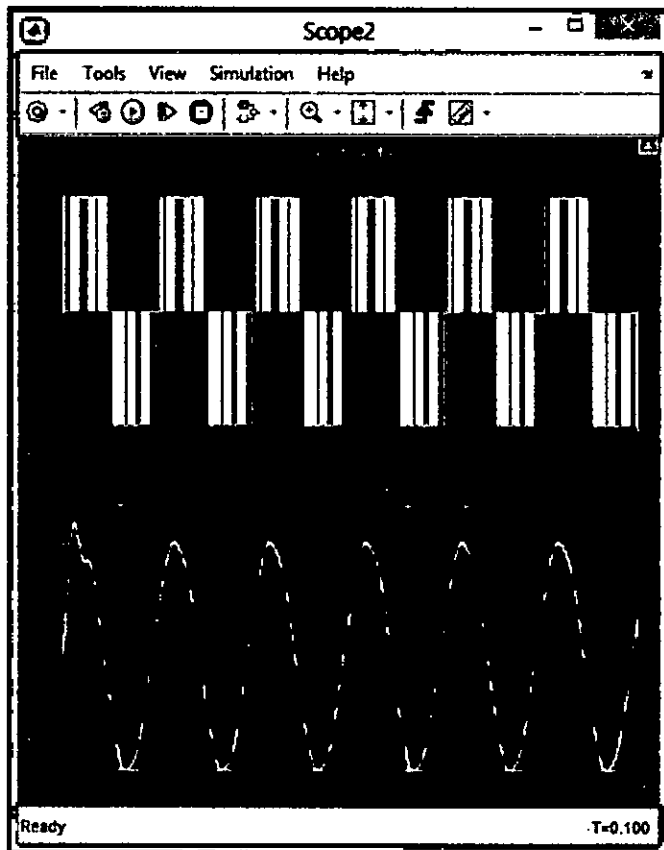
Figura N° 4.47
INVERSOR EN CASCADA SIMÉTRICO DE DOS
ETAPAS CON FUENTE COMÚN EN SIMULINK



Fuente: mathworks.com

Para una tensión de entrada al inversor de 400 VDC, se obtiene una tensión aproximada de 340 VAC a 60 Hz, tal como puede apreciarse en la Figura N° 4.48.

Figura N° 4.48
TENSIÓN EN LOS EXTREMOS DE LA ENTRADA DEL TRANSFORMADOR Y TENSIÓN DE SALIDA (CARGA)

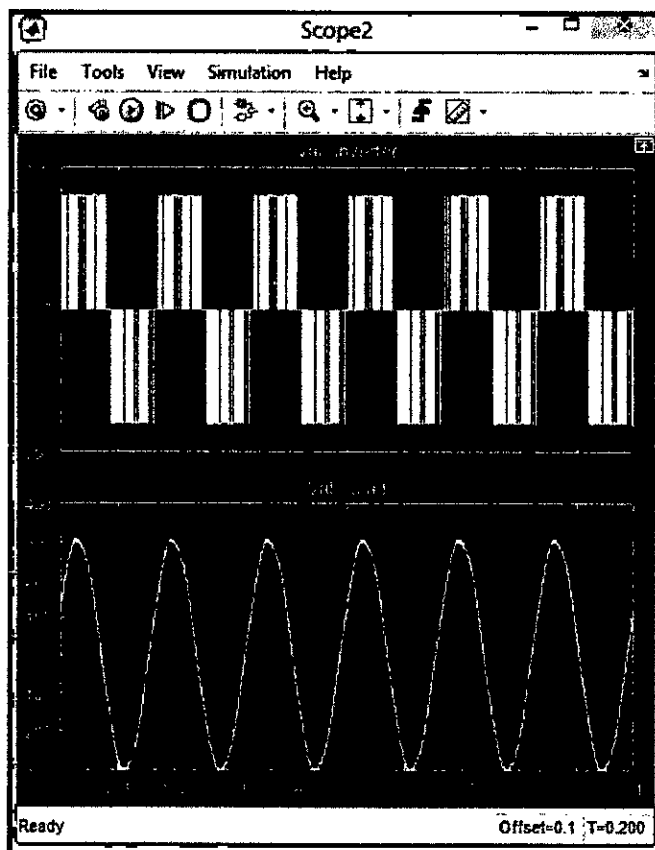


Fuente: elaboración propia

Para una tensión de entrada de 260 VDC, se produce una tensión de salida aproximada de 300 VAC, tal como se puede observar en la Figura N° 4.49.

Figura N° 4.49

TENSIÓN EN LOS EXTREMOS DE LA ENTRADA DEL TRANSFORMADOR Y TENSIÓN DE SALIDA (CARGA)



Fuente: elaboración propia

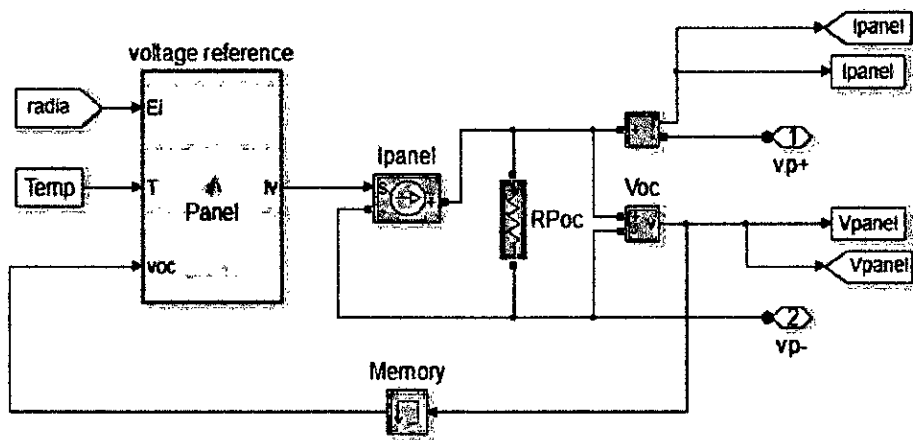
4.2.2 Diseño del subsistema solar fotovoltaico

- **Modelado y simulación del arreglo de paneles solares fotovoltaicos**

El arreglo de paneles solares fotovoltaicos, comprende considerar una distribución de paneles en serie y en paralelo, de tal forma que se incremente la tensión en el primer caso, y se incremente la corriente en el segundo caso.

El programa en Simulink, usando código embebido se muestra en la Figura N° 4.50.

Figura N° 4.50
ESQUEMA DE UN ARREGLO DE PANELES SOLARES
USANDO CÓDIGO EMBEBIDO



Fuente: elaboración propia

Se ha considerado 10 paneles en serie y cinco en paralelo. El programa en Matlab se lista a continuación:

```
% array_panel.m
% PROGRAMA PARA USARLO EN SFUNCTION DE SIMULINK
% ARREGLO DE PANELES SOLARES DE 90 W
%
% SIMULACIÓN CON RADIACIÓN Y TEMPERATURA CONSTANTE
%
s=10; % número paneles en serie
p=5; % número paneles en paralelo
Ein= 1000; % constante de irradiación
Ei= 1000; % irradiancion efectiva a la que opera el panel
Tn= 25; % constante de temperatura
T= Tn; % temperatura a la que opera el panel (T=Tn=25°C):
CV= 0.8;
b= 0.0684; % parámetro de ajuste
Isc= 5.47; % corriente de cortocircuito
Voc= 21.80; % voltaje de circuito abierto
Vpmax= 18.10; % voltaje en el punto de máxima potencia
Ipmax= 4.98; % corriente en el punto de máxima potencia
```

```

TCv= -0.1261; % coeficiente de voltaje
TCi= 0.00418; % coeficiente de corriente
Vmax= 22.042;
Vmin= 18.190;
Ix= p*(Ei/Ein)*(Isc+(TCi*(T-Tn)));
Vx= (s*(Ei/Ein)*(TCv)*(T-Tn)+(s*Vmax)-((s*(Vmax-
Vmin))*(exp((Ei/Ein)*(log((Vmax-Voc)/(Vmax-Vmin))))));
Iv= ((Ix/(1-(exp(-1/b))))*(1-(exp((Voc/(b*Vx))-1/b)))));

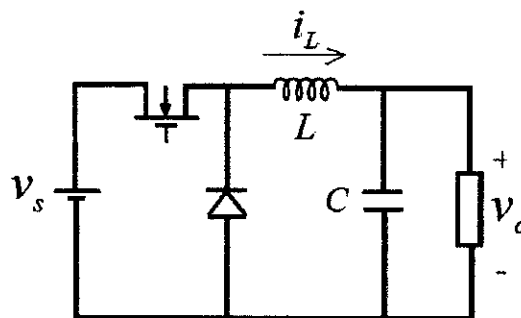
```

Al ejecutarse, se obtiene una corriente máxima de 27.35 A y un voltaje máximo de 218 V, por consiguiente una potencia máxima de 5,962.3 W.

- **Diseño, simulación y control MPPT y PID del convertidor DC/DC Buck**

El convertidor DC/DC Buck es uno que se encarga de reducir la tensión de entrada V_s a un nivel de tensión inferior o igual a V_o , el cual debe mantenerse constante si se supone un capacitor C muy grande en el filtro de salida. La Figura N° 4.51 muestra el convertidor Buck.

Figura N° 4.51
ESQUEMA DE UN CONVERTIDOR DC/DC BUCK



Fuente: Campos D. [3]

La tensión de salida viene dada por:

$$v_o = U v_s \quad (4.69)$$

El modelado matemático del convertidor Buck se realiza asumiendo que este trabaja en modo-continuo de conducción (MCC) [3], es decir la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor poseen un valor constante, y una parte fluctuante alrededor de un valor promedio. Esta condición de operación está ligada a los valores de la inductancia, la resistencia de carga del convertidor y a la frecuencia de conmutación, por la relación mostrada en la Tabla N° 4.4.

Tabla N° 4.4
CONDICIONES PARA MODO CONTINUO DE CONDUCCIÓN (MCC)

Buck	Boost	Buck/Boost
$\frac{2Lf}{R} > (1-U)$	$\frac{2Lf}{R} > U(1-U)^2$	$\frac{2Lf}{R} > (1-U)^2$

Fuente: Campos D. [3]

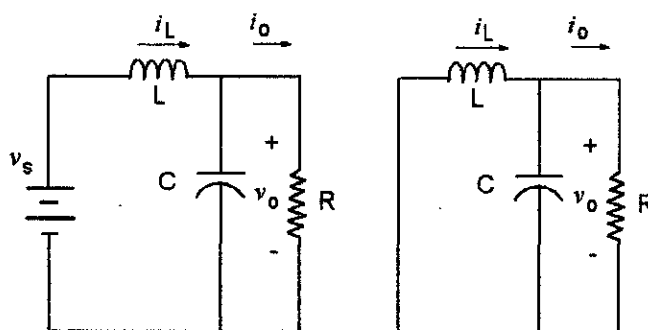
La técnica utilizada para obtener el modelo del convertidor se basa en espacio de estados, y en definir 2 condiciones de operación del interruptor activo Q: ON ($\mu=1$) y OFF ($\mu=0$). Enseguida, se toman 2 estados en el sistema: corriente en el inductor i_L y el voltaje de salida v_o (el cual también representa el voltaje en el capacitor). Los circuitos equivalentes para ambas condiciones de operación se muestran en la Figura N° 4.52.

Las ecuaciones que corresponden al convertidor DC/DC Buck, vienen dadas por:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L} + \frac{V_s}{L} \mu \tag{4.70}$$

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \tag{4.71}$$

Figura N° 4.52
MODOS DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR
DC/DC BUCK (IZQ. ON, DER. OFF)



Fuente: Campos D. [3]

La variable de control viene representada por $\mu = 0$ o $\mu = 1$ determinando el estado del interruptor Q.

El modelo promedio de las ecuaciones (4.70) y (4.71) incluyendo variaciones en el voltaje de alimentación, está dado por:

$$\dot{x}_1 = -\frac{x_2}{L} + \frac{V_s}{L}u + \frac{\hat{v}_s}{L}u \quad (4.72)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (4.73)$$

Por otro lado, considerando la aproximación lineal de (4.72) y (4.73) alrededor de la condición nominal de operación (V_s, V_o, U, R) , se obtiene el modelo lineal en espacio de estados:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_s \\ L \\ 0 \end{pmatrix} \hat{u} + \begin{pmatrix} U \\ L \\ 0 \end{pmatrix} \hat{v}_s \quad (4.74)$$

$$y = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (4.75)$$

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones (4.74) y (4.75), y aplicando el teorema de superposición, se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{v_o(s)}{d(s)} = \frac{V_o}{U} \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.76)$$

$$G_2(s) = \frac{v_o(s)}{v_s(s)} = U \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.77)$$

Consideremos los siguientes datos del convertidor Buck:

$$V_s=218; V_o=180; f=5000; r=0.005; R=10; T=1/f; U=V_o/V_s;$$

Al correr el programa ftbuck.m, tenemos que en la Figura N° 4.53 se muestra la respuesta de la tensión de salida para un ciclo de trabajo U, y en la Figura N° 4.54, se presenta la respuesta de la salida en función de la variación de tensión de entrada (perturbación) y el ciclo de trabajo U.

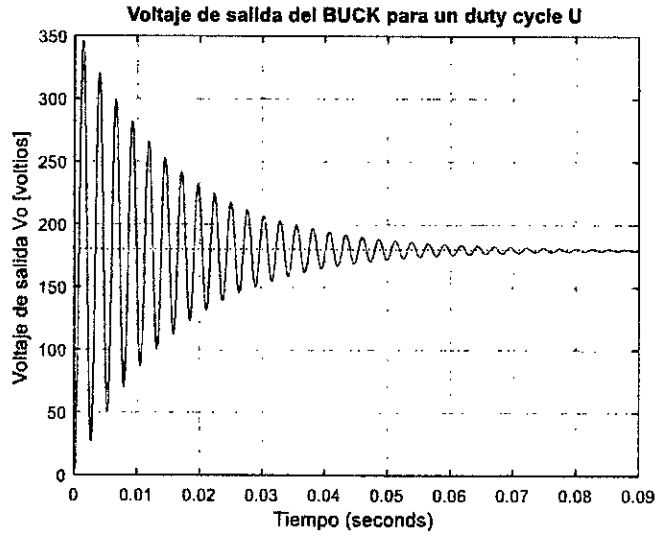
Al correr el programa ft_buck, también se calcula y obtienen los siguientes valores para L y C:

$$L = 2.1789 \times 10^{-4} \text{ Henrios}$$

$$C = 8 \times 10^{-4} \text{ Faradios}$$

Figura N° 4.53

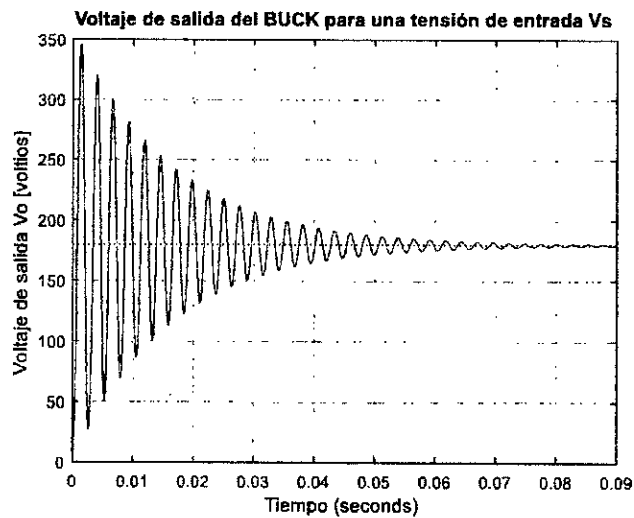
**VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UN
CICLO DE SERVICIO $U = 0.8257$**



Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.54

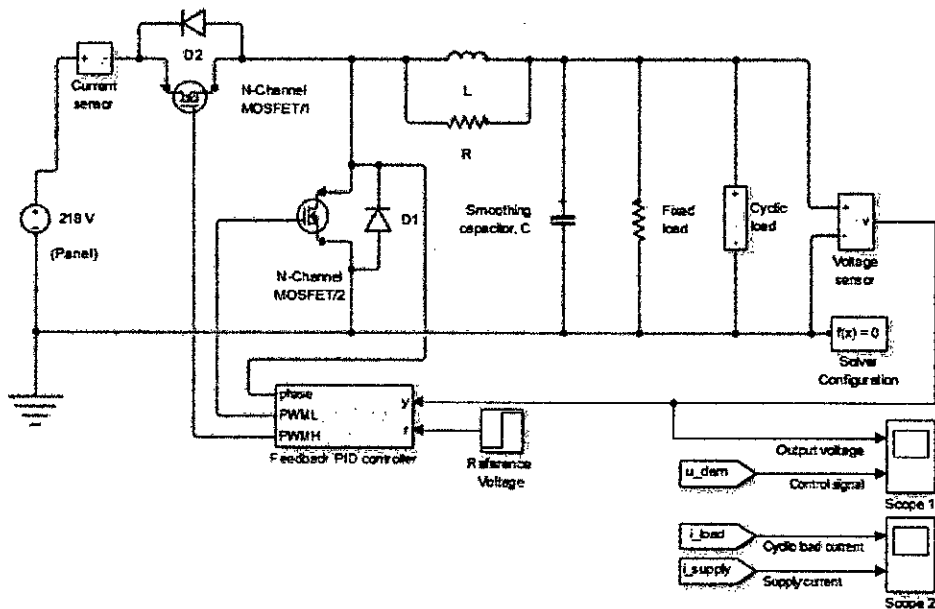
**VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UNA
TENSIÓN DE ENTRADA V_s Y CICLO DE
SERVICIO $U = 0.8257$**



Fuente: elaboración propia

Ahora, la implementación del control PID del convertidor Buck en la plataforma Simulink, se puede observar en la Figura N° 4.55.

Figura N° 4.55
ESQUEMA DE CONTROL PID DEL
CONVERTIDOR BUCK EN LA PLATAFORMA
SIMULINK

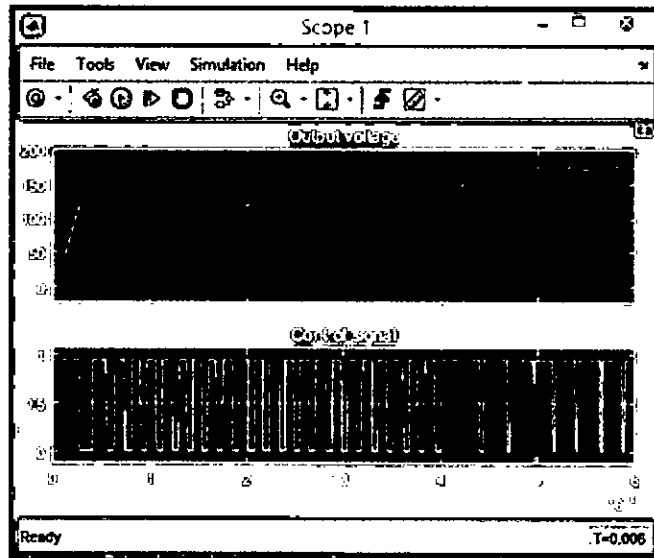


Fuente: elaboración propia

Considerando los mismos datos, y tan solo seleccionando la salida (Voltaje de referencia) con escalones que va de 120 V a 180 V, obtendremos en la salida una adecuada respuesta, tal como se muestra en la Figura N° 4.56.

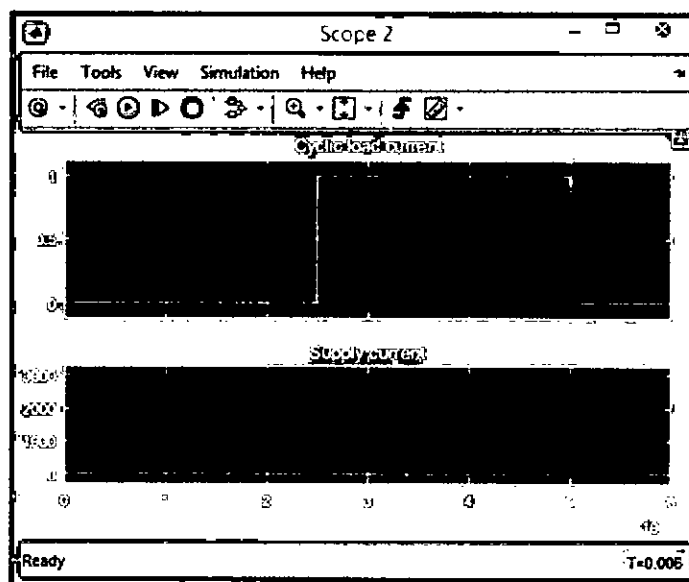
Asimismo en la Figura N° 4.57 se puede observar la corriente del ciclo de carga.

Figura N° 4.56
VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR
BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK



Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.57
VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR
BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK



Fuente: elaboración propia

Para el caso del generador eólico, las etapas del convertidor DC/DC Boost y el inversor son en realidad los mismos que el del generador solar fotovoltaico, con la pequeña diferencia que los niveles de voltaje a la entrada del Boost y a la entrada del inversor son de otra magnitud.

Para el prototipo (generador solar fotovoltaico a escala)

Como se mencionó en el capítulo I, para efectos de validar el presente trabajo, se ha implementado un generador solar fotovoltaico a escala reducida de 90W, con orientación automática de dos ejes (seguidor solar), en el cual se han implementado los algoritmos de Control MPPT y PID para los convertidores DC/DC y el SPWM para los inversores de potencia, usando Arduino como plataforma de desarrollo.

Hagamos un pequeño repaso sobre la clasificación de los seguidores fotovoltaicos.

Clasificación de los seguidores por grado de libertad

Los seguidores según los grados de libertad se clasifican en:

Seguidores de un solo eje.

Sólo tienen un grado de libertad, es decir se mueven en un solo eje de rotación. Hay varios tipos de seguidores de un solo eje, que explicamos brevemente a continuación.

- **Un solo eje horizontal.** Este tipo de seguidor tiene el eje horizontal respecto al suelo. En este caso, el eje horizontal está orientado Norte-Sur, y a lo largo del día los paneles horizontales girarán sobre este eje, siguiendo el movimiento aparente del Sol. Este tipo de seguidor es aceptable en latitudes cercanas al ecuador.
- **Un solo eje vertical.** En este caso el eje está vertical respecto al suelo. En latitudes lejanas al ecuador son recomendables este tipo de seguidores. Los paneles suelen estar orientados con un ángulo

respecto al eje de rotación, y cuando giran forman un cono alrededor del eje.

- **Un solo eje inclinado.** Los seguidores de un solo eje que no sea ni vertical ni horizontal, es un seguidor de eje inclinado. Los paneles están inclinados con la misma inclinación del eje, y cuando giran forman un cilindro alrededor de este eje. Una variación de este tipo de seguidor es la que tiene la inclinación igual a la latitud donde se encuentra la instalación, con una orientación de su eje de polo a polo. Es decir que apunte a un polo celeste, simulando con su movimiento el de La Tierra, solo que en sentido contrario.

Seguidores de dos ejes.

Estos tienen dos grados de libertad, es decir dos ejes de rotación. Estos ejes están típicamente perpendiculares el uno del otro. El eje primario es el que está fijo respecto a la Tierra, y el otro eje, que está referenciado al eje primario se llama eje secundario.

Hay varios tipos de seguidores de dos ejes. Estos son los más comunes:

Seguidor de dos ejes de inclinación (TIP-TILT). Este tipo de seguidores tienen su eje primario horizontal respecto a la tierra. El eje secundario es perpendicular al primario. Los ejes de rotación de este tipo de seguidor están típicamente alineados con el Norte magnético o con algún paralelo Este-Oeste. Uno de los ejes permite orientar al panel en su posición Norte-Sur y el otro en la posición Este-Oeste que se encuentre el Sol en el cielo.

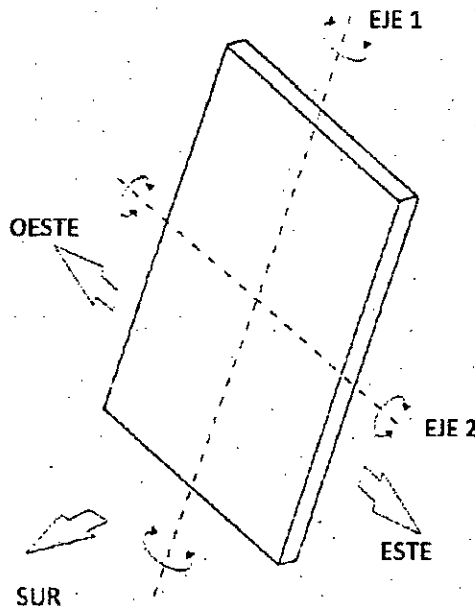
Seguidor de Acimut-Altitud. Este tipo de seguidor tiene su eje primario vertical respecto al suelo. El eje secundario es perpendicular al primario. Este tipo de seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo; esto es especialmente importante en el caso de tratarse de grandes instalaciones. Este tipo de seguidor ubica a los paneles solares

frente al Sol girando alrededor de su eje vertical un ángulo conocido como Acimut, y elevando la inclinación de los paneles a la Altitud a la que se encuentra el Sol.

Selección del tipo de seguidor

De los tipos mencionados anteriormente, el seguidor solar que se ha implementado es el de dos ejes de ladeo-inclinación y del tipo activo. En la Figura N° 4.58 se puede apreciar al seguidor solar fotovoltaico de dos ejes con eje primario horizontal, es decir no tiene eje primario vertical.

Figura N° 4.58
ESQUEMA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS
EJES DEL TIPO LADEO-INCLINACIÓN



Fuente: Guardado D. [18]

La diferencia principal respecto al otro tipo de seguidor de dos ejes es que en nuestro caso, se puede tener un buen seguimiento con sólo utilizar uno

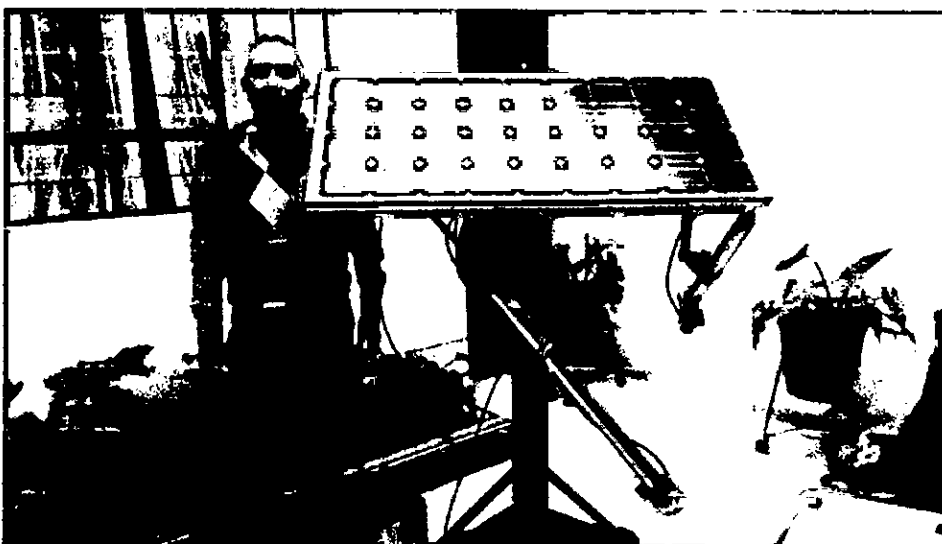
de los movimientos en un día, ya que la declinación del Sol no varía mucho en un solo día.

Para el movimiento en dos ejes se han construido dos actuadores lineales, conteniendo cada uno un motor DC, una caja de reducción, un tornillo sin fin, dos tubos de acero inoxidable (uno delgado e interno, y el otro de mayor sección y externo).

En la Figura N° 4.59 se presenta al seguidor solar fotovoltaico de dos ejes, con una potencia de 90 W, totalmente autónomo. Los detalles constructivos sobre el módulo del seguidor solar no se presentan debido a que se está considerando como materia objeto de patente. Solo se puede indicar que la altura del pedestal de soporte es de 1.20 m sin considerar la base móvil ni el despliegue del panel.

Figura N° 4.59

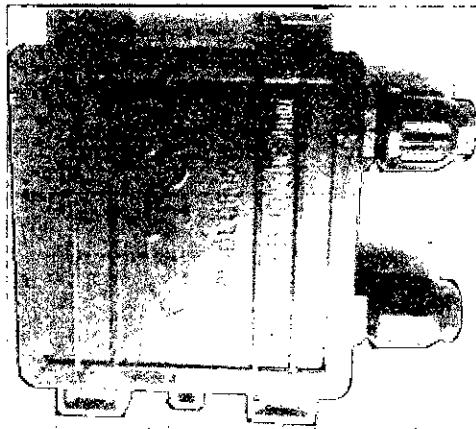
**FOTOGRAFÍA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS
EJES DEL TIPO LADEO-INCLINACIÓN, DE 90 W**



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.60 se muestra la caja de conexiones del panel solar, ubicada en la parte posterior superior.

Figura N° 4.60
CAJA DE CONEXIONES DEL PANEL SOLAR



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.61 se puede observar la estructura metálica conformada por dos bastidores (uno mayor y el otro menor) y el parante de soporte de los bastidores y el panel solar fotovoltaico.

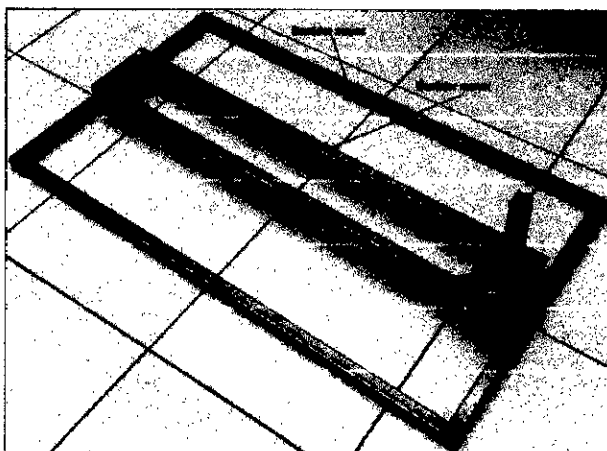
Figura N° 4.61
ESTRUCTURA METÁLICA CONFORMADA POR
LOS BASTIDORES Y EL PARANTE DE SOPORTE



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.62 se presenta la disposición de los bastidores metálicos.

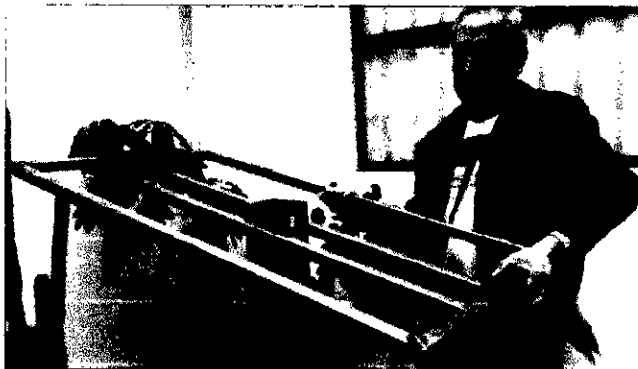
Figura N° 4.62
DISPOSICIÓN DE LOS BASTIDORES
METÁLICOS



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.63 se presenta la simulación de la disposición de los bastidores en el parante de soporte.

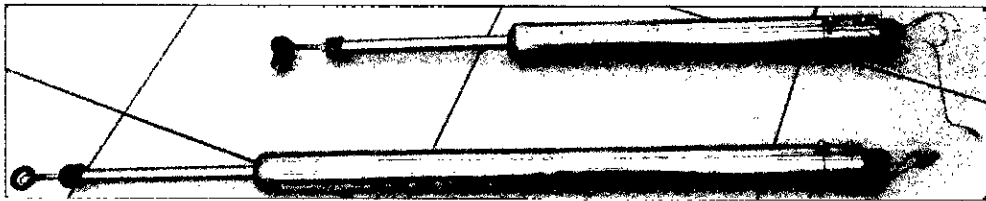
Figura N° 4.63
SIMULACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS
BASTIDORES EN EL PARANTE DE SOPORTE



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.64 se muestran los actuadores lineales con servomotor DC sin caja reductora (primera versión).

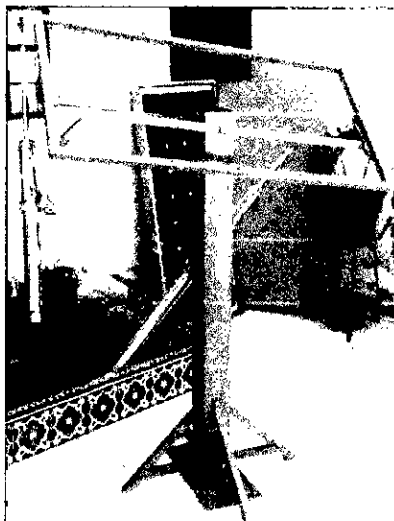
Figura N° 4.64
ACTUADORES LINEALES CON SERVOMOTOR DC Y
SIN CAJA REDUCTORA (PRIMERA VERSIÓN)



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.65 se presenta la estructura del módulo de soporte con los actuadores lineales (primera versión).

Figura N° 4.65
INSTALACIÓN DE LOS ACTUADORES LINEALES A LA
ESTRUCTURA DE SOPORTE (PRIMERA VERSIÓN)



Fuente: elaboración propia

Para la primera versión del módulo (Figura N° 4.65), se utilizaron servomotores de corriente continua, que sirvieron para pruebas iniciales, mientras se consiguieran servomotores con caja reductora. En la Figura N° 4.66 se muestra el servomotor indicado.

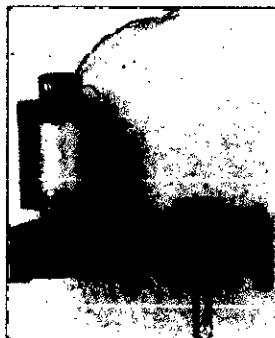
Figura N° 4.66
SERVOMOTOR DC SIN CAJA REDUCTORA (PRIMERA
VERSIÓN)



Fuente: elaboración propia

Debido a que no se consiguió los servomotores DC con caja reductora, en el tiempo previsto, se consiguió motores DC con caja reductora, en cuyo eje de salida se acopló un encoder óptico para el sensado de posición angular. En la Figura N° 4.67 se muestra dicho motor.

Figura N° 4.67
MOTOR DC CON CAJA REDUCTORA (SEGUNDA
VERSIÓN)



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.68 se muestra el encoder óptico instalado en una base de soporte, que en conjunto se fija en el eje de salida del motor DC (eje de la caja reductora).

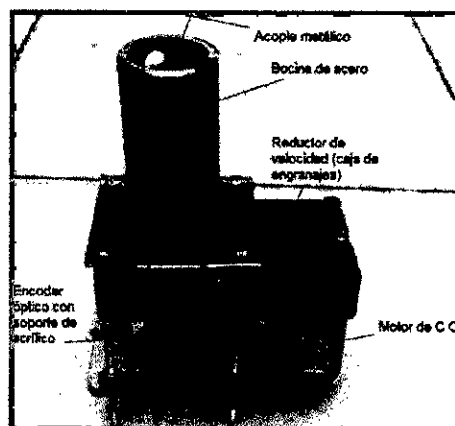
Figura N° 4.68
INSTALACIÓN DEL ENCODER ÓPTICO EN UNA BASE DE ACRÍLICO



Fuente: elaboración propia

Para acoplar el motor DC con caja reductora al tornillo sin fin y a los cilindros del actuador lineal, primero se tuvo que construir un acople metálico para unir el eje de salida de la caja reductora con el tornillo sin fin, luego se construyó la bocina de acero inoxidable para el acople del motor DC con reducción a los cilindros del actuador. En la Figura N° 4.69 puede observarse tal estructura.

Figura N° 4.69
INSTALACIÓN DEL ACOPLE Y DE LA BOCINA PARA LA CONEXIÓN AL TORNILLO SIN FIN Y A LOS CILINDROS DEL ACTUADOR LINEAL

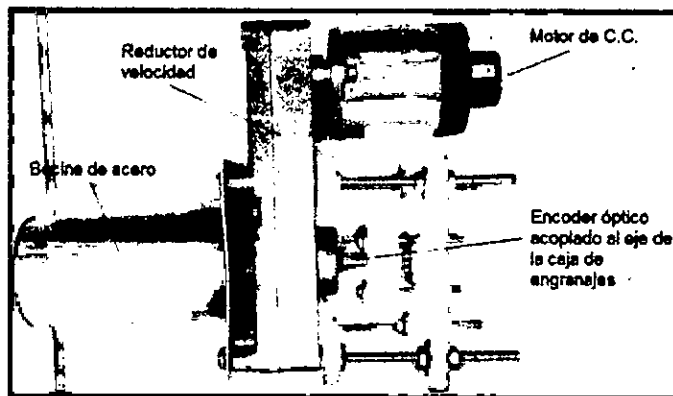


Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.70 se presenta una vista lateral del sistema mostrado en la Figura N° 4.69.

Figura N° 4.70

VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE LA FIGURA N° 4.69

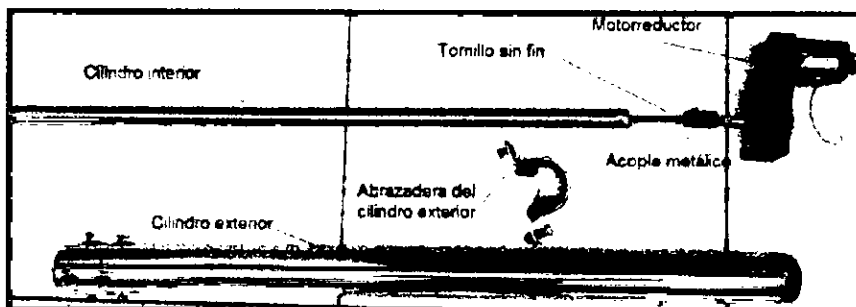


Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.71 se presenta la disposición de los cilindros de acero inoxidable interior y exterior, conjuntamente con las conexiones del motorreductor, el tornillo sin fin y el acople.

Figura N° 4.71

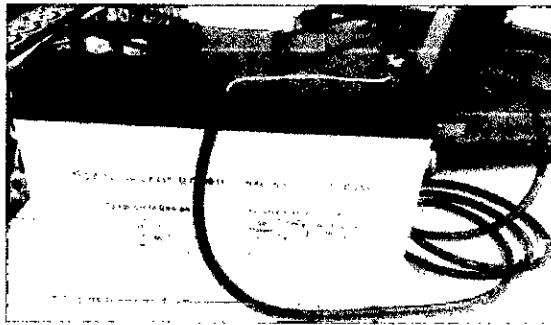
DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS DE ACERO INOXIDABLE INTERIOR Y EXTERIOR, CONJUNTAMENTE CON LAS CONEXIONES DEL MOTORREDUCTOR, EL TORNILLO SIN FIN Y EL ACOPLE



Fuente: elaboración propia

Para el funcionamiento del módulo experimental del generador solar fotovoltaico, se necesita de una batería de características especiales, por lo que se compró e instaló una batería solar de ciclo profundo, tal como se muestra en la Figura N° 4.72.

Figura N° 4.72
BATERÍA SOLAR CON LOS CABLES DE CONEXIÓN
AL CONVERTIDOR DC/DC BUCK



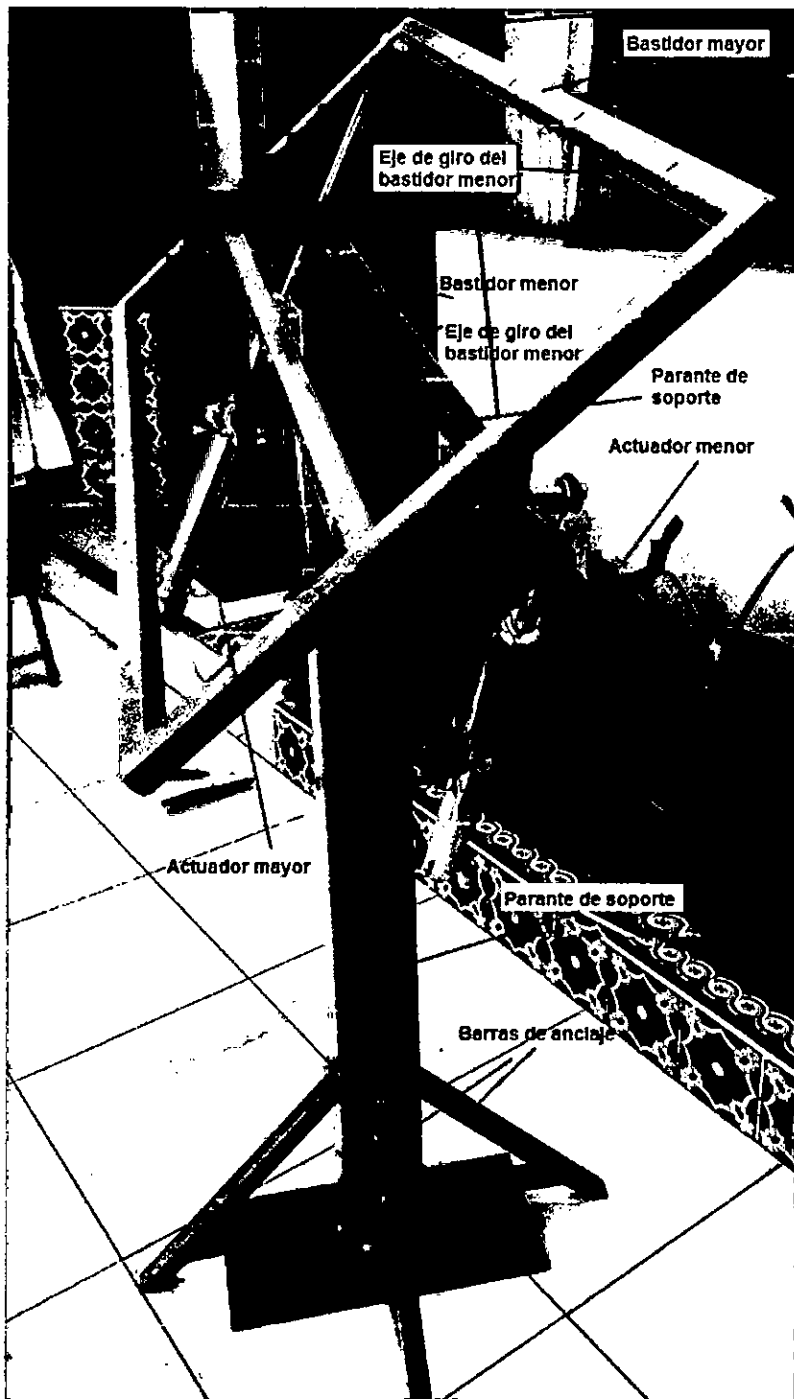
Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.73 se puede observar los componentes de la estructura metálica, incluido los actuadores lineales; pero todavía sin el panel solar.

Asimismo, en la Figura N° 4.74 se aprecia la instalación completa, incluido el panel solar, los sensores fotovoltaicos, la caja de conexiones eléctricas y electrónicas, la base móvil, los cables de conexión y la batería.

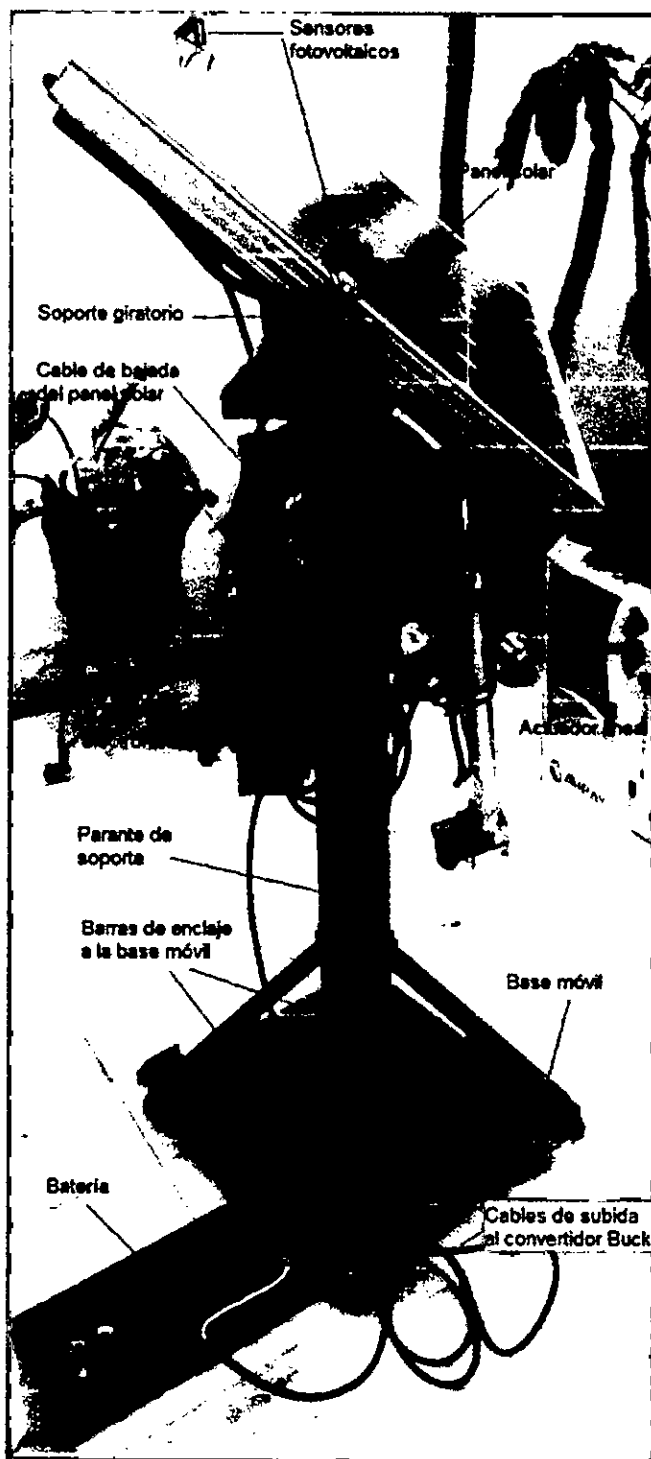
En la Figura N° 4.75 se aprecia la parte posterior de todo el sistema.

Figura N° 4.73
COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA,
INCLUIDO LOS ACTUADORES LINEALES



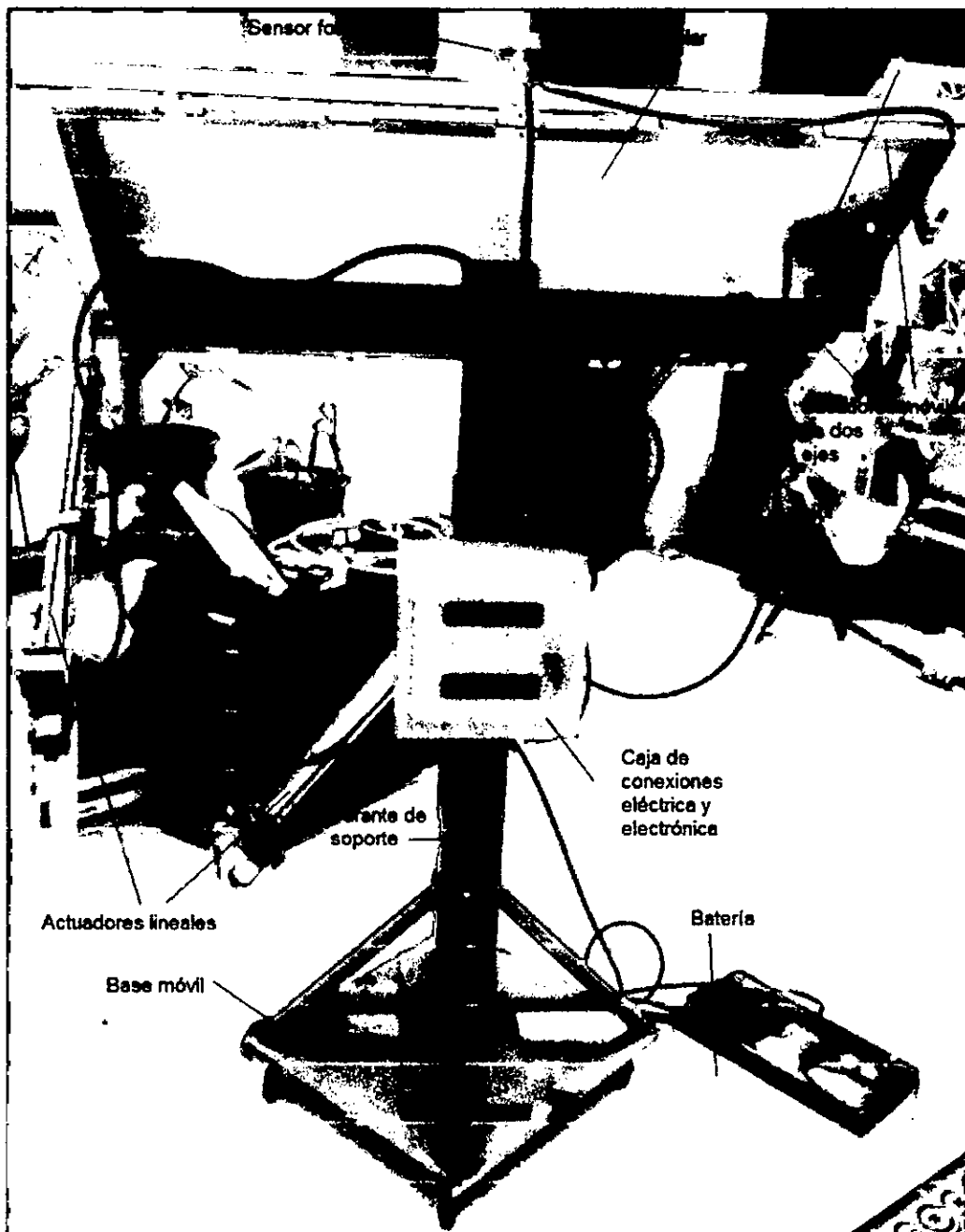
Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.74
INSTALACIÓN COMPLETA DE TODO EL SISTEMA
DEL GENERADOR SOLAR FOTOLTAICO



Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.75
VISTA POSTERIOR DE TODO EL SISTEMA DEL
GENERADOR SOLAR FOTOLTAICO



Fuente: elaboración propia

A continuación se desarrolla cada una de las etapas del prototipo de generador solar fotovoltaico (módulo SV).

- **Modelado del panel solar fotovoltaico y simulación de su comportamiento**

En esta sección se aborda el modelado del panel solar fotovoltaico, y para ello se ha considerado la hoja de especificaciones del panel solar proporcionada por el fabricante, tal como se muestra en la Tabla N° 4.5.

Tabla N° 4.5
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL PANEL
SOLAR MONOCRISTALINO SFM 90W DE SINGFO
SOLAR ENERGY SCI & TECH CO., LTD

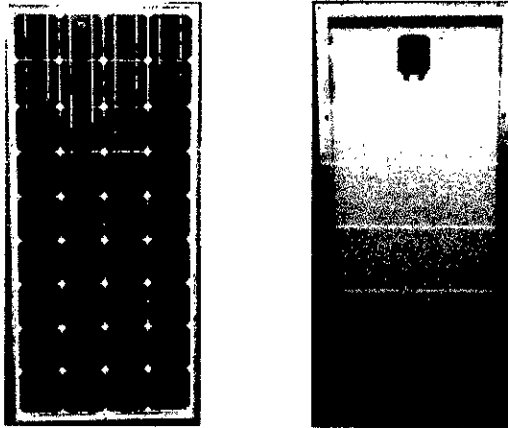
Potencia máxima (P_{max})	90W
Voltaje en P_{max} (V_{mpp})	18.1V
Corriente en P_{max} (I_{mpp})	4.98A
Corriente en corto circuito (I_{sc})	5.47A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	21.8V
Rango de temperatura	-40 a 85°C

Fuente: elaboración propia

En las Figuras 4.76 (a) y 4.76 (b) se muestran fotografías del panel solar SFM 90W de la parte frontal y posterior.

Figura 4.76

**(a) VISTA FRONTAL, (b) VISTA POSTERIOR
DEL PANEL FOTOVOLTAICO**

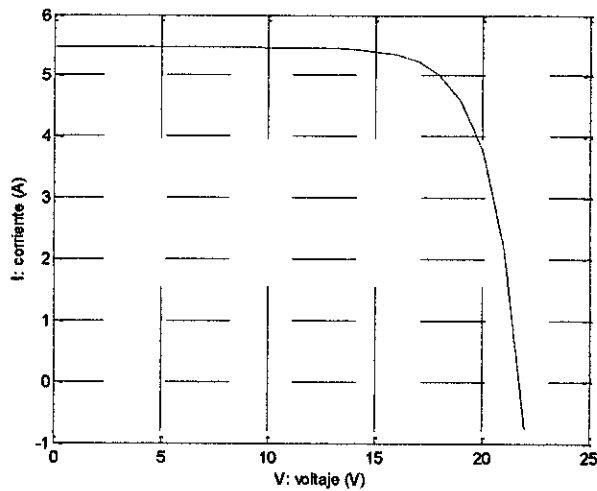


Fuente: Elaboración propia

Si reemplazamos los valores de la Tabla N° 4.5 en las ecuaciones (2.38) y (2.39), se obtienen las ecuaciones específicas de corriente y voltaje que permiten obtener las curvas V-I del panel solar, tal como se muestra en la Figura N° 4.77.

Figura N° 4.77

RESPUESTA V-I DEL PANEL FOTOVOLTAICO SFM 90W

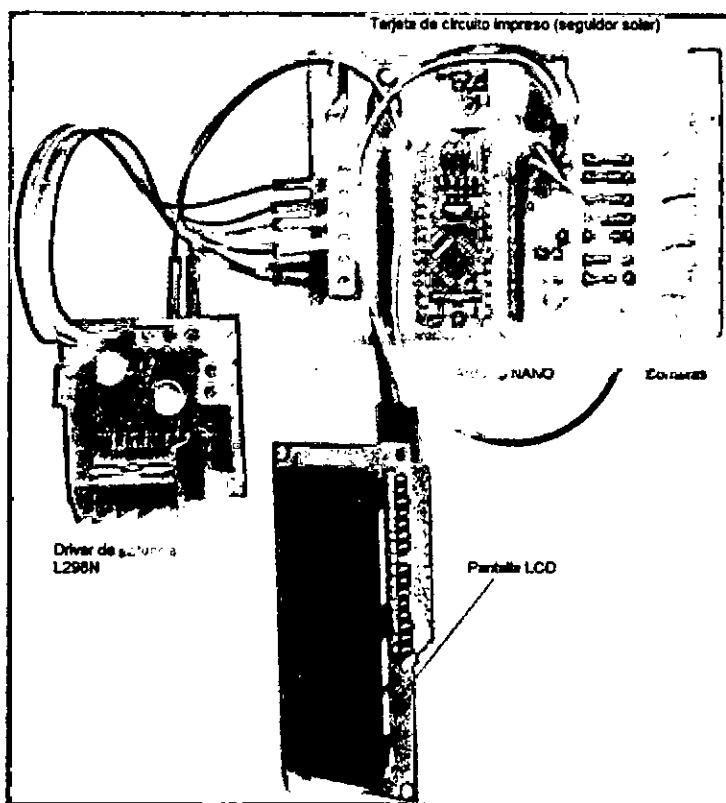


Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la curva V-I para un arreglo de 10 paneles fotovoltaicos SFM 90W en paralelo, es análogo al obtenido en la Figura 4.77, variando tan solo el nivel de corriente en 10, es decir una corriente máxima de 55 A en cortocircuito.

El circuito del seguidor solar también usa Arduino nano v3.0, un driver de potencia L298N y una pantalla LCD, tal como se muestra en la Figura N° 4.78

Figura N° 4.78
PLACA DEL SEGUIDOR SOLAR

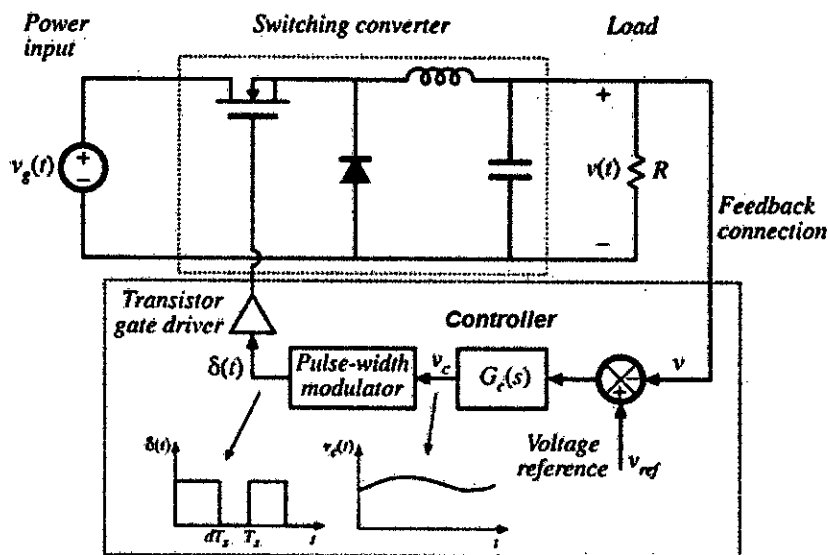


Fuente: Elaboración propia

- **Diseño, simulación y control MPPT y PID del convertidor DC/DC Buck**

El esquema del sistema de control genérico para el convertidor Buck, se muestra en la Figura 4.79, en el que encuentra el convertidor Buck (planta) y el sistema de control realimentado, conformado por el bloque de diferencia entre el setpoint y la señal sensada, el controlador propiamente dicho, el PWM, el driver de gatillado o disparo para el mosfet [11].

Figura N° 4.79
ESQUEMA EN LAZO CERRADO DEL CONVERTIDOR BUCK



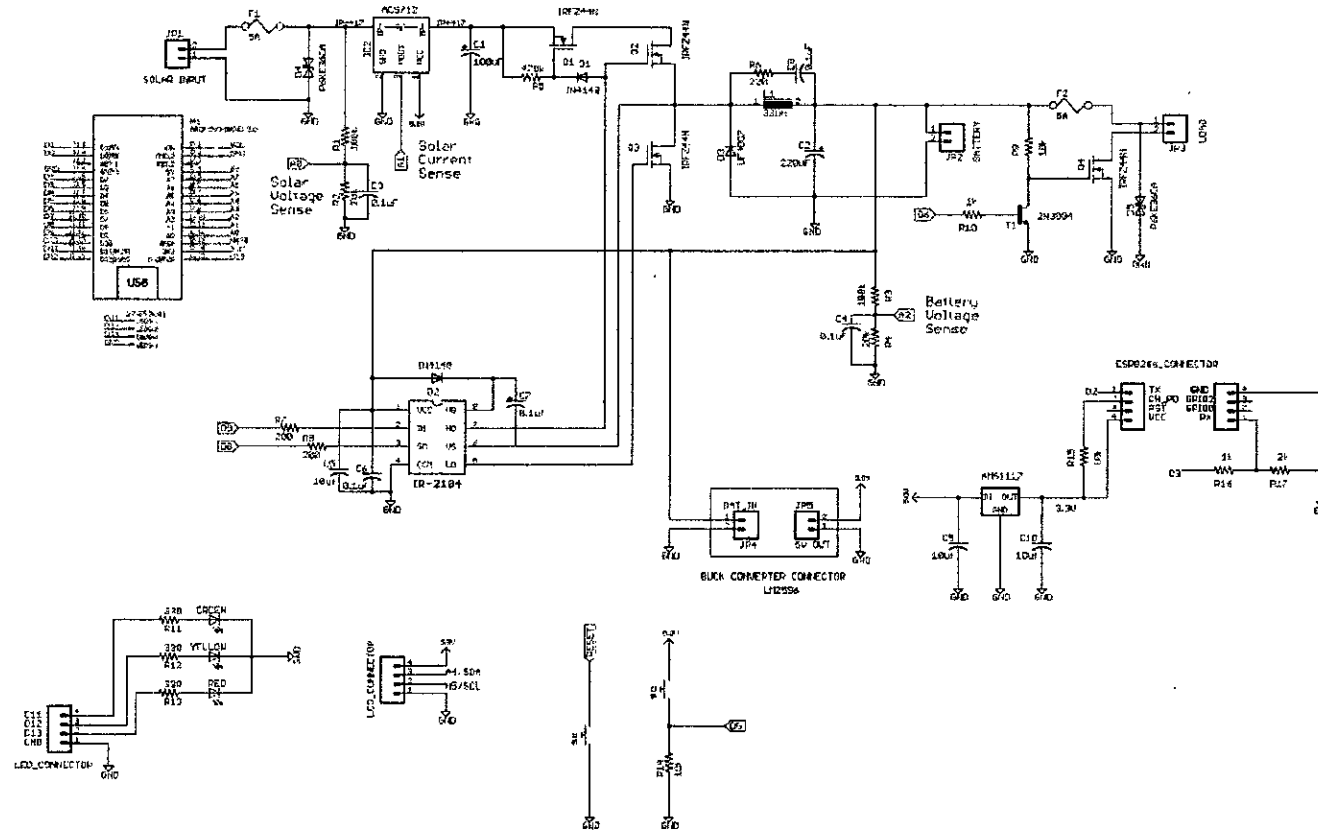
Fuente: Córdova S., Ospina S. [7]

El esquema del convertidor DC-DC Buck específico se muestra en la Figura N° 4.80. Como se puede observar, consta de dos Buck, uno mayor compuesto por tres MOSFET en configuración serie-paralelo, un sensor de corriente solar, un sensor de voltaje de salida, un MOSFET de protección de carga y el ARDUINO NANO

v3.0. El segundo Buck está compuesto por un Buck LM2596, que recibe una tensión de entrada de 12 V y produce a su salida una tensión de 5V para alimentar al ARDUINO NANO v3.0. En la Figura N° 4.81 se muestra al Arduino nano v3.0, y en la Figura N° 4.82 se presenta al pequeño convertidor DC/DC Buck LM2596.

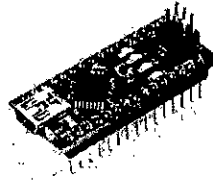
Figura N° 4.80

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC-DC BUCK



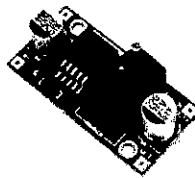
Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.81
ARDUINO NANO V3.0



Fuente: Arduino

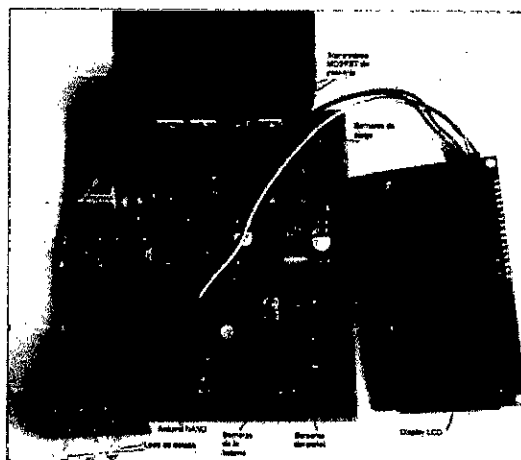
Figura N° 4.82
MÓDULO LM2596 (CONVERTIDOR BUCK)



Fuente: Alibaba.com

La implementación del convertidor DC/DC Buck se puede apreciar en la Figura N° 4.83.

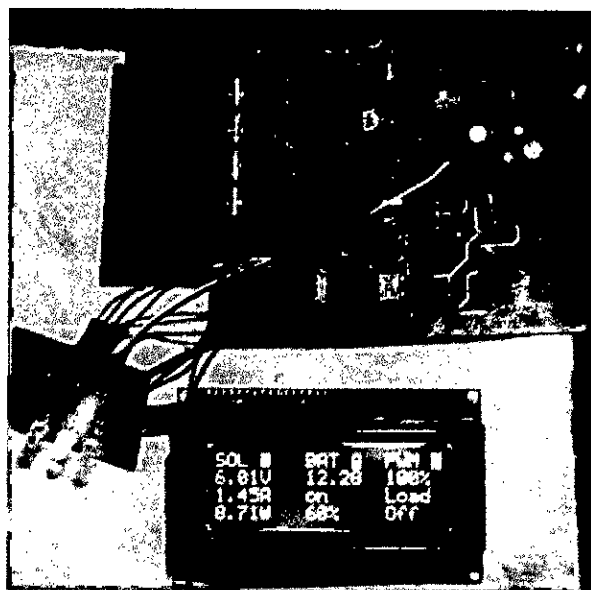
Figura N° 4.83
CONVERTIDOR DC/DC BUCK



Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Figura N° 4.84 podemos observar la lectura del display LCD del controlador de carga (convertidor Buck).

Figura N° 4.84
LECTURA DEL CONVERTIDOR DC/DC
BUCK



Fuente: elaboración propia

- **Diseño, simulación y control MPPT y PID en tiempo real del convertidor DC/DC Boost**

Control PID del Convertidor Boost

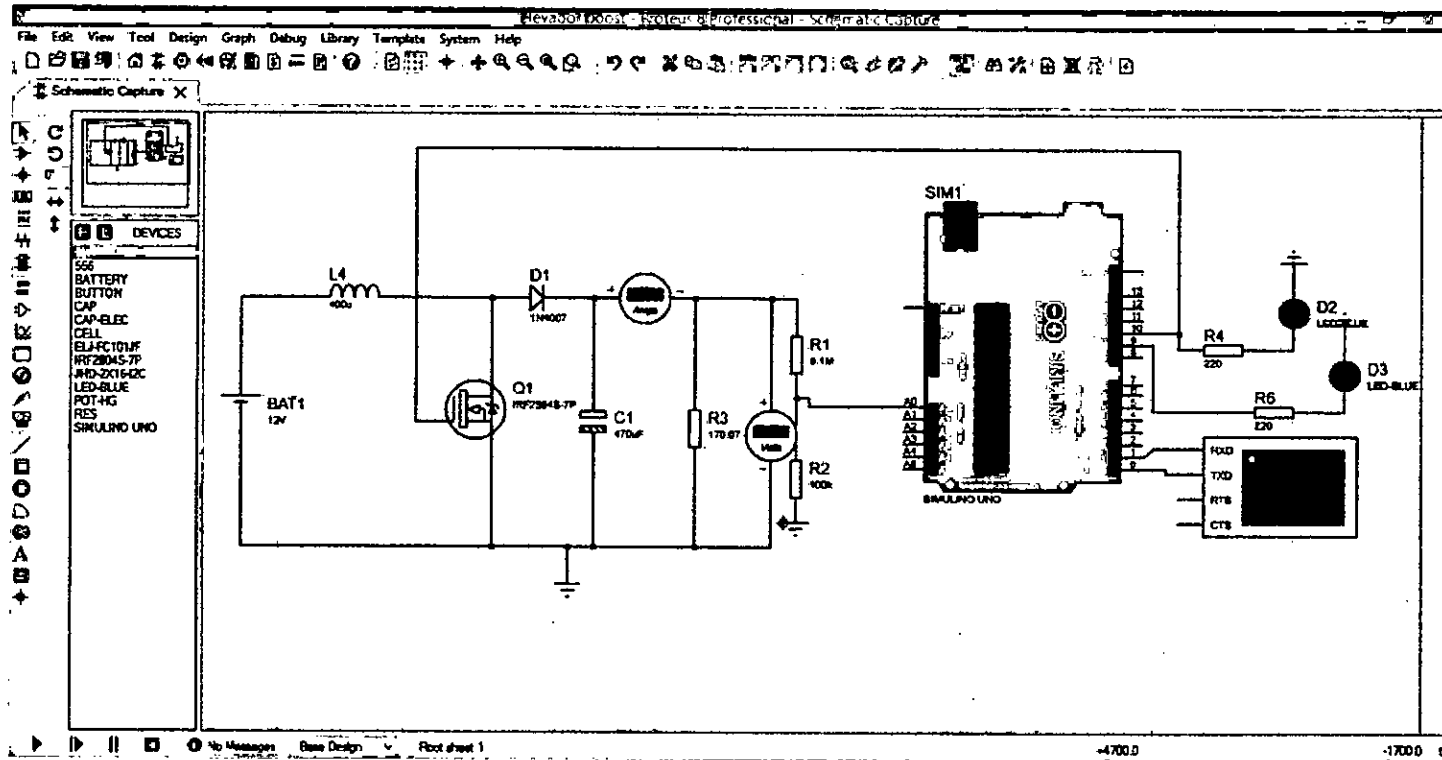
En la Figura N° 4.85 se muestra el diagrama esquemático en Proteus del convertidor DC-DC Boost, microcontrolado con ARDUINO. Para ejecutar el programa "elevador Boost", primero tiene que ejecutarse el programa de Control PID en ARDUINO y copiar el "hex" dentro de la dirección del ícono del ARDUINO editado en el Proteus. Se compila el programa en código Arduino, se ejecuta y visualizamos

los resultados tal como se muestra en la Figura N° 4.86. El programa de Control PID del Boost se presenta en el Anexo E.

Control MPPT del Convertidor Boost

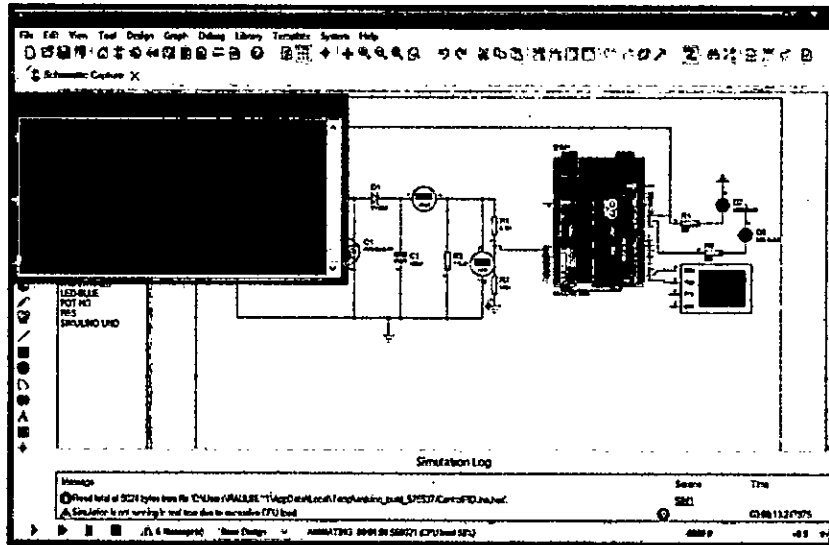
En la Figura N° 4.87 se presenta el resultado del control MPPT del convertidor Boost, considerando una tensión de entrada $V_s = 180$ VDC y un ciclo de servicio $U = 0.4$. La tensión de salida obtenida es $V_o = 300$ VDC.

Figura 4.85
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC-DC BOOST



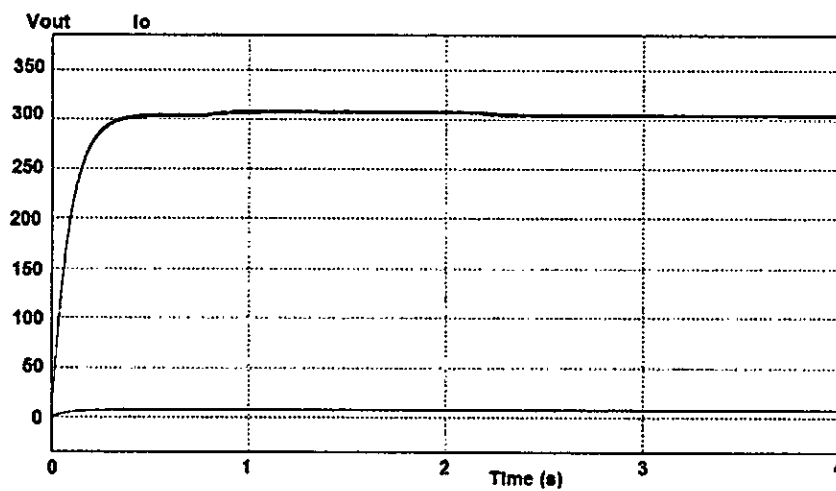
Fuente: elaboración propia

Figura 4.86
RESULTADOS DE LA COMPILACIÓN Y EJECUCIÓN DEL
CONVERTIDOR DC-DC BOOST



Fuente: elaboración propia

Figura 4.87
RESULTADOS DEL CONTROL MPPT DEL
CONVERTIDOR DC-DC BOOST

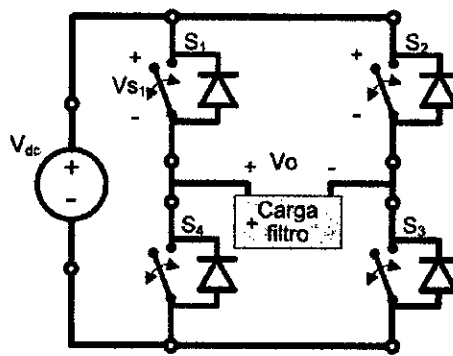


Fuente: elaboración propia

- **Diseño y control SPWM en tiempo real del inversor monofásico usando Arduino UNO v3**

La topología usada es la del inversor monofásico tipo puente, tal como se muestra en la Figura N° 4.88.

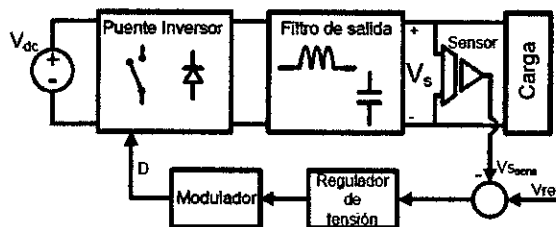
Figura 4.88
TOPOLOGÍA PUENTE COMPLETO DEL
INVERSOR MONOFÁSICO



Fuente: Delgado M. [8]

En la Figura 4.87 se presenta el esquema completo de la implementación del control SPWM del inversor monofásico tipo puente completo en modo de tensión [8].

Figura 4.89
ESQUEMA COMPLETO DE LA IMPLEMENTACIÓN
DEL INVERSOR MONOFÁSICO PUENTE COMPLETO



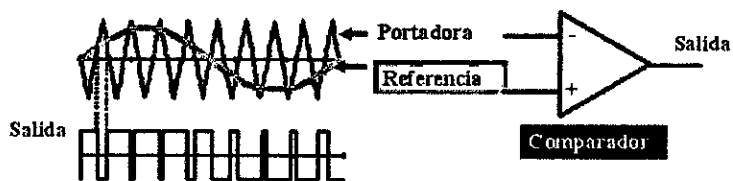
Fuente: Delgado M. [8]

Como se indicó en el capítulo II (parte teórica), la técnica SPWM se basa en emplear una modulación múltiple (varios pulsos de disparo en cada medio ciclo de voltaje de salida). El ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso.

Como se muestra en la Figura 4.90, para generar las señales de control de los interruptores de forma que se consigan formas de onda de este tipo son necesarias dos señales:

- Una señal de referencia: es la forma de onda que se pretende conseguir a la salida. En caso de los inversores suele ser una onda senoidal.
- Una señal portadora: es la que establece la frecuencia de conmutación. Se utiliza una señal triangular.

Figura 4.90
ESQUEMA PARA LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE CONTROL SPWM



Fuente: Bueno A. [82]

Previamente recordemos que el índice de modulación en frecuencia es:

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{referencia}} = \frac{f_{triangular}}{f_{senoidal}} \quad (4.78)$$

Para pequeños valores del índice de modulación en frecuencia ($m_f < 21$), la forma de onda de la señal triangular y la señal de control

(senoidal) deben ser sincronizadas para evitar sub-armónicos de la frecuencia fundamental. Cuando m_f se hace grande, los sub-armónicos son reducidos mejorando este aspecto. Si m_f es impar, se puede demostrar como en la serie de Fourier de la tensión de salida aparecen únicamente armónicos de orden impar. Si m_f es par, aparecen armónicos pares e impares, junto con un nivel de continua.

Existen dos variantes de la técnica SPWM:

- a) SPWM bipolar; y
- b) SPWM unipolar.

Cada una de las dos variantes tienen sus ventajas y desventajas; sin embargo en el presente trabajo se implementó el control SPWM unipolar con armónicos desplazados en frecuencia lo máximo posible respecto al primer armónico, que será de frecuencia muy baja, para facilitar el filtrado, por lo cual se necesita una señal moduladora. Una de las ventajas de la modulación SPWM unipolar es que reduce el número de armónicos

Mediante esta técnica se utilizan dos señales de referencia senoidal V_{sin_p} y V_{sin_n} , y una señal portadora triangular V_{tri} que fija la frecuencia de conmutación, de modo que:

Si $V_{sin_p} > V_{tri} \rightarrow V_A = +V_{DC}$ (Q1 ON).

Si $V_{sin_p} < V_{tri} \rightarrow V_A = 0$ (Q2 ON).

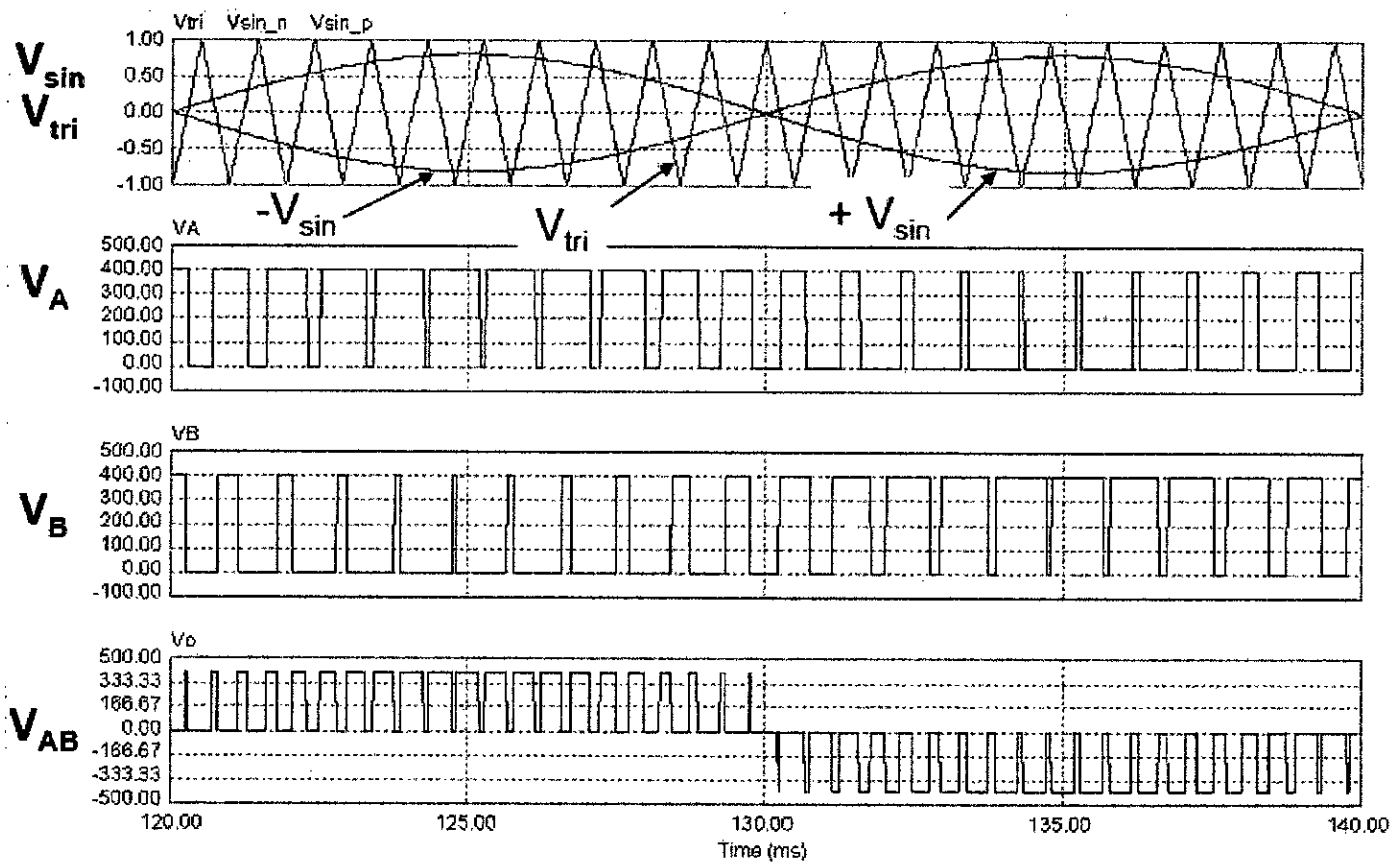
Si $V_{sin_n} < V_{tri} \rightarrow V_B = 0$ (Q4 ON).

Si $V_{sin_n} > V_{tri} \rightarrow V_B = +V_{DC}$ (Q3 ON).

En la Figura 4.91 se muestran las formas de onda para la modulación SPWM unipolar.

FORMAS DE ONDA PARA LA MODULACIÓN SPWM UNIPOLAR

Figura 4.91



Fuente: elaboración propia

Salida del inversor

La salida de un inversor modulado por PWM puede ser ajustada para que sea:

- a) Senoidal pura;
- b) Senoidal modificada; o
- c) Onda cuadrada.

Esto viene indicado por el índice de modulación en amplitud, definido como:

De esta forma variando el índice de modulación de amplitud m_a , para una tensión de alimentación constante se puede modificar la tensión a la salida del inversor. No obstante, dependiendo del índice de modulación, la distribución de los armónicos en la salida es distinta.

El índice de modulación viene dada por:

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{portadora}} = \frac{f_{senoidal}}{f_{triangular}} \quad (4.79)$$

Así para:

- Si $m_a \leq 1$, los armónicos se sitúan a alta frecuencia alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos. El voltaje pico de la componente de frecuencia fundamental de voltaje de salida preserva una relación lineal entre el índice de modulación en amplitud y el valor VDC, así:
$$V_0 = m_a \cdot V_{DC} \quad (4.80)$$
- Si $m_a > 1$, se produce un efecto conocido por el nombre de sobremodulación, que tiene por resultado un aumento en el

contenido armónico. De hecho para este caso, la amplitud de la componente de frecuencia fundamental no varía linealmente con m_a .

En tal sentido, para el diseño específico de nuestro inversor monofásico, se consideró las siguientes especificaciones:

$f = 60 \text{ Hz}$: Frecuencia de salida del inversor

$V_o = 230 \text{ V}$: Tensión eficaz de salida

$P_o = 90 \text{ W}$: Potencia máxima de salida

$V_{DC} = 240 \text{ V}$: Tensión de entrada DC al inversor

$f_{tri} = 10 \text{ Hz}$: Frecuencia portadora

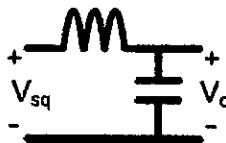
$THD < 5\%$: Distorsión armónica

Diseño del filtro LC

El objetivo del filtro es conseguir aplicar a la carga únicamente el armónico fundamental de todo el espectro que aparece a la salida del puente H. Se trata de un filtro LC paso bajo de 2do. Orden que se muestra en la Figura N° 4.92.

Figura N° 4.92

FILTRO LC PASA BAJO DE SEGUNDO ORDEN



Fuente: Delgado M. [8]

Para diseñar el filtro se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Debe atenuar los armónicos producidos por la conmutación, que aparecen a frecuencias f_{in} y múltiplos o $2 f_{in}$ y múltiplos según el tipo de modulación.
- Debe dejar intacto el armónico fundamental.
- No debe amplificar los armónicos de baja frecuencia. (En relación al pico de resonancia).

Considerando que el filtro está alimentando a una carga de potencia $P_o=90$ W, entonces el valor de la resistencia es:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{(230)^2}{90} = 588 \Omega$$

Con una inductancia de 9mH y una capacitancia de 12uF, la frecuencia natural del filtro es:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} = 484.3 \text{ Hz}$$

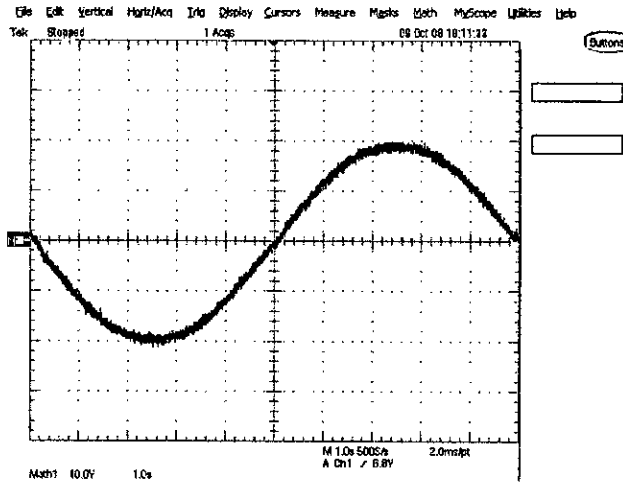
Lo que significa que está alejada del séptimo armónico (420Hz) y del noveno armónico (540Hz).

Por consiguiente, la función de transferencia del filtro con carga resistiva R es:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.81)$$

En la Figura N° 4.93 se muestra la tensión de salida del filtro.

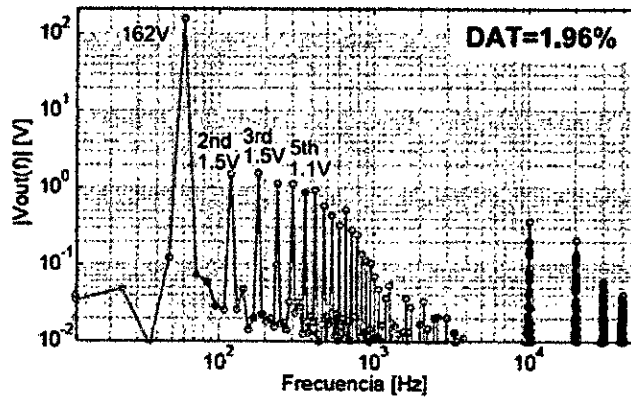
Figura N° 4.93
TENSIÓN DE SALIDA DEL FILTRO



Fuente: elaboración propia

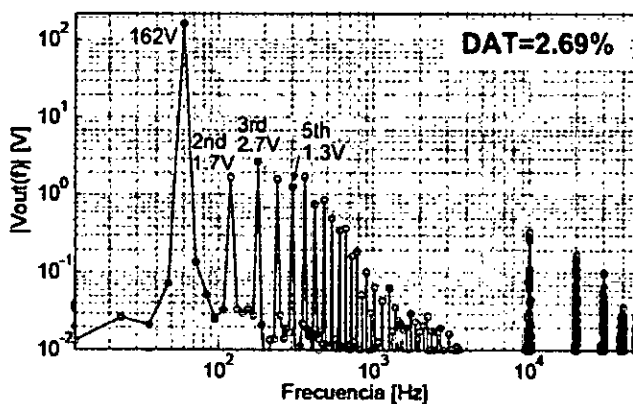
En la Figura N° 4.94 se muestra la distorsión armónica total (DAT) sin carga, y en la Figura N° 4.95 la distorsión armónica total a plena carga.

Figura N° 4.94
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL (DAT) SIN CARGA



Fuente: elaboración propia

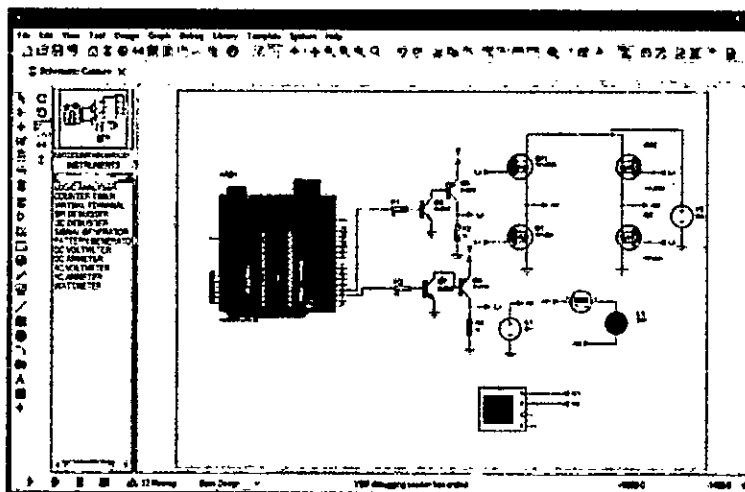
Figura N° 4.95
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL (DAT) A PLENA CARGA



Fuente: elaboración propia

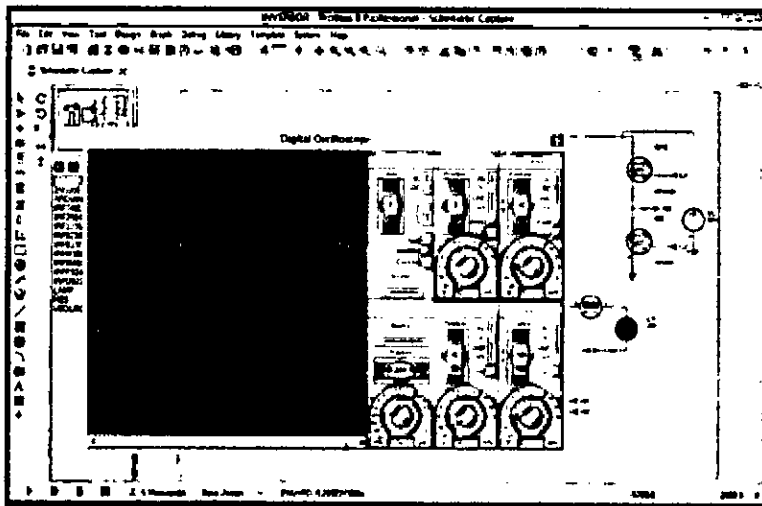
En la Figura 4.96 se muestra el esquema de Control SPWM del inversor monofásico trabajando en ambiente Arduino, y los resultados se muestran en la Figura N° 4.97.

Figura N° 4.96
ESQUEMA DEL CONTROL SPWM DEL
INVERSOR MONOFÁSICO



Fuente: elaboración propia

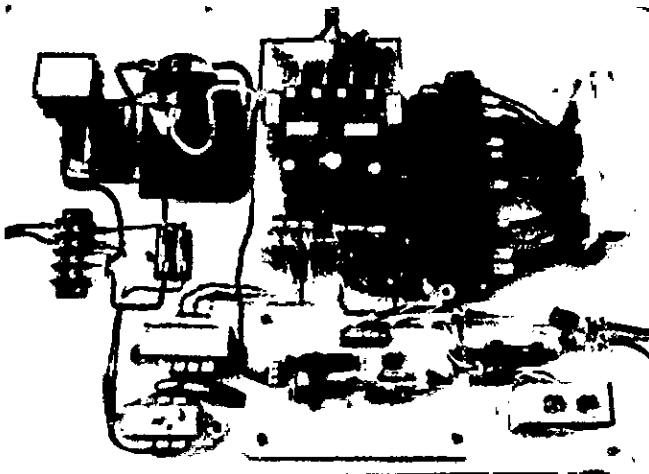
Figura N° 4.97
RESULTADOS DEL CONTROL SPWM DEL
INVERSOR MONOFÁSICO



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.98 se muestra la implementación del inversor monofásico.

Figura N° 4.98
TARJETA DEL INVERSOR MONOFÁSICO



Fuente: elaboración propia

4.3 Población y muestra

No corresponde al presente trabajo de Tesis, debido a que la población se reduce al objeto de estudio que es el sistema de generación eólico-solar.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas para recolección de datos son de tipo cuantitativo, en consecuencia el plan para la indicada recolección de datos es la siguiente:

a) Instrumentos para la medición de velocidad de viento y radiación solar

Para la medición de la velocidad de viento se utilizó un anemómetro. La zona de medición es la asociación de ganaderos "Virgen de Fátima", del distrito de Végueta, provincia de Huaura. El instrumento de medición fue un anemómetro AN450 con acceso a puerto USB y software para PC.

Para la medición de la radiación solar se usó el piranómetro CMP10 de Kipp & Zonen, estándar secundario con la mejor relación calidad-precio-rendimiento del mercado. Adicionalmente se usó un multímetro digital SAUNA para la medición de la tensión generada por el panel solar fotovoltaico en forma directa.

A nivel de hardware y software se usó Arduino y una laptop Toshiba Core i5. Asimismo, a nivel de software se usó Matlab y Simulink. También se usó Excel para el procesamiento y análisis de datos.

b) Instrumentos para la medición de la tensión, potencia y calidad de energía generadas.

A nivel de hardware y software se usó Arduino y una laptop Toshiba Core i5. Asimismo, a nivel de software se usó Matlab y Simulink. También se usó Excel para el procesamiento y análisis de datos.

c) Instrumentos para la medición de las perturbaciones en el sistema.

Representados por sus indicadores paramétricos como son: variaciones de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$), variaciones de dirección (N, S, E, etc.). Para la medición de estas variables se usó un anemómetro que incluye la medición de temperatura y/o humedad relativa, así como de una brújula.

4.5 Procedimientos de recolección de datos

Luego de considerar las técnicas e instrumentos de recolección de datos, a continuación se precisan los procedimientos usados en la recolección de datos para el subsistema eólico y para el subsistema solar. En el caso del subsistema solar se especifican las pruebas efectuadas con el prototipo.

a) Medición de la velocidad de viento y radiación solar

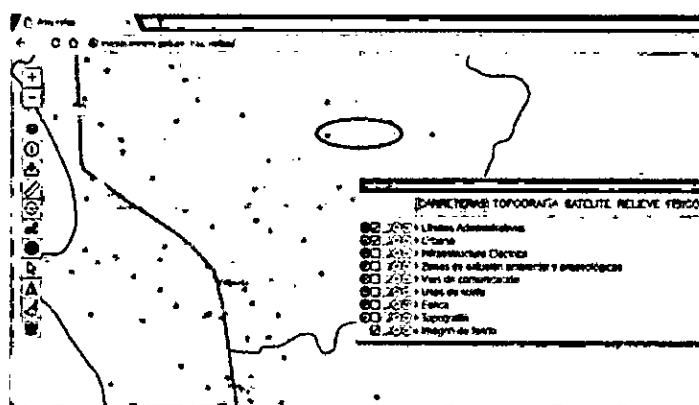
Velocidad de viento:

En la zona de medición se tomó muestras de velocidad de viento, haciendo uso del Web-GIS del Atlas eólico de Perú, puesto en uso en diciembre del 2016 (recientemente).

En la Figura N° 4.99 se puede observar la localización satelital de "Virgen de Fátima" (círculo azul), y en la Figura N° 4.100 se puede observar el relieve del terreno. En la Figura N° 4.100 se puede observar el punto de medida y la gráfica de velocidad de viento a una altura de 10m., dando una **velocidad de viento de 2.27 m/s**. Esta medición, de acuerdo al sistema de localización, puede tener imprecisiones, sobre todo en zonas de mucho relieve, por lo que su uso es importante pero no determinante en ese caso. La solución es disponer de estaciones meteorológicas, que permitan una mayor precisión para esos casos; por lo que se tiene que comparar las

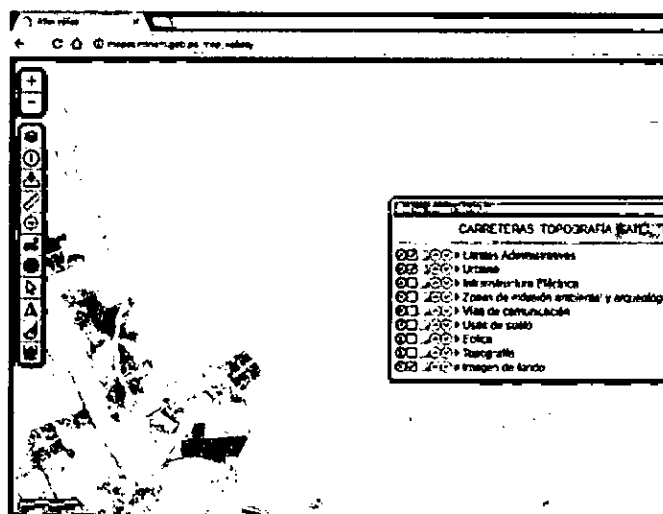
mediciones satelitales con las realizadas directamente en el terreno, para luego hacer un ajuste en la medición satelital.

Figura N° 4.99
LOCALIZACIÓN SATELITAL DE LA ASOCIACIÓN “VIRGEN DE FÁTIMA”



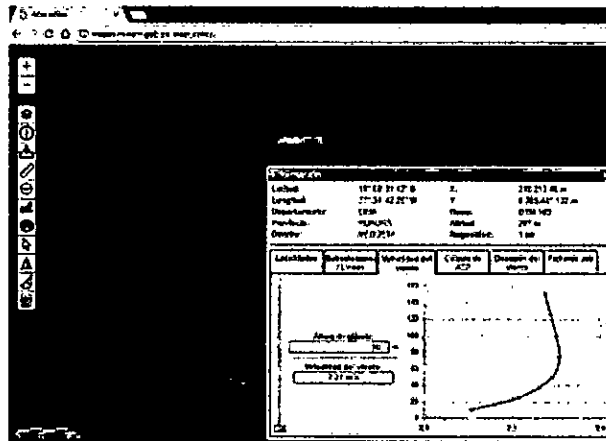
Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.100
RELIEVE DEL TERRENO DE LA ASOCIACIÓN “VIRGEN DE FÁTIMA”



Fuente: elaboración propia

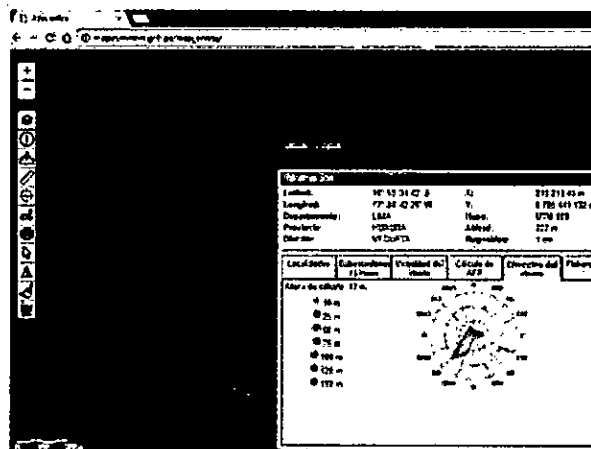
Figura N° 4.101
GRÁFICA DE LA VELOCIDAD DE VIENTO



Fuente: elaboración propia

En la Figura N° 4.102 se observa la rosa de viento para esa zona, arrojándonos una dirección predominante del viento hacia el Sur Oeste (SO). Allí se indica que la latitud es 10° 58' 34.42" S, y la longitud es 77° 34' 42.26" W, rugosidad de 1cm.

Figura N° 4.102
ROSA DE VIENTO EN EL PUNTO DE LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA



Fuente: elaboración propia

Radiación solar:

El SENAMHI tiene disponible estaciones meteorológicas en todo el Perú, quizá no con el número que debería tenerse. La estación más cercana a Végueta, ubicada en Huaura, es la estación 120535 ubicada en Andahuasi, con una latitud Sur (S) de 11° 08', longitud Oeste (W) de 77° 14', con 470 msnm, según se puede apreciar en la Tabla 4.6 (parte de estaciones en uso).

Tabla N° 4.6

ALGUNAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

CODIGO	ESTACION	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	LAT	LONG	ALT (msnm)
				(S)	(W)	
110601	La Punta	Lima	Callao	12°04'	77°10'	13
110631	La Capilla 2	Lima	Cafete	12°31'	76°33'	468
110632	Isa Chíncha Norte	Ica	Pisco	13°38'	76°23'	20
110640	Huamari	Ica	Ica	13°50'	75°35'	800
110650	Hacienda Bernaldes	Ica	Pisco	13°45'	75°57'	250
110655	San Lorenzo	Huancavelica	Tayacaja	12°18'	74°48'	2600
110678	Huayro	Cuzco	La Convención	13°04'	72°27'	1700
110681	Ocobamba	Cuzco	La Convención	12°50'	72°26'	1900
110686	Paruro	Cuzco	Paruro	13°46'	71°50'	3084
110689	Paucartambo	Cuzco	Paucartambo	13°19'	71°35'	3042
110691	Pilcopata	Cuzco	Paucartambo	13°05'	71°01'	900
110693	Quincemil	Cuzco	Quispicanchi	13°13'	70°45'	650
110698	Río Grande	Ica	Palpa	14°32'	75°13'	280
120535	Andahuasi	Lima	Huaura	11°08'	77°14'	470
130501	Alcantarilla	Lima	Huaura	11°03'	77°33'	120
130610	Von Humboldt	Lima	Lima	12°05'	76°56'	238
130617	Modelo	Lima	Lima	12°06'	77°02'	137
130637	Pampa de Villacuri	Ica	Ica	13°57'	75°48'	430
130700	San Camilo	Ica	Ica	14°04'	75°43'	398
130804	La Joya	Arequipa	Arequipa	16°35'	71°55'	1292
130805	Pampa de Majes	Arequipa	Caylloma	16°19'	72°12'	1434
140100	Iquitos	Loreto	Maynas	3°45'	73°15'	126
140206	Yurimaguas	Loreto	A. Amazonas	5°52'	76°07'	187
140305	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	7°08'	78°29'	2620
140306	Chochapoyas	Amazonas	Chochapoyas	6°14'	77°49'	1834
140307	Moyobamba	San Martín	Moyobamba	6°03'	76°56'	860
140308	Jurijá	San Martín	M. Caceres	7°08'	76°45'	270
140500	Aeropuerto Internac.	Lima	Callao	12°00'	77°07'	13
140600	Pisco	Ica	Pisco	13°44'	76°13'	6
140609	Quincemil	Cuzco	Quispicanchi	13°13'	70°46'	619
140701	San Juan	Ica	Nazca	15°20'	75°08'	30
140900	Tacna	Tacna	Tacna	18°03'	70°15'	452
160200	Talara	Piura	Talara	4°34'	81°15'	88

Fuente: Atlas de Energía Solar del Perú

b) Medición de tensión, potencia y calidad de energía generadas

Esta sección corresponde al prototipo, es decir al generador solar fotovoltaico a escala, tratado en la sección 4.2.2. En este caso las mediciones efectuadas fueron realizadas usando Arduino nano v3.0. Dichas mediciones son las siguientes:

a) Voltaje generado:

- El voltaje medido a la salida del sistema solar fotovoltaico arroja valores de 12 V DC a la salida del convertidor DC/DC Buck
- El voltaje medido a la salida del convertidor Boost fue de $240V \pm 2\%$, y
- El voltaje medido a la salida del inversor fue de $220V \pm 2\%$.

b) Frecuencia eléctrica: la frecuencia generada a la salida del sistema arroja valores de 60 Hz, con variaciones de 0.6 % hacia arriba o debajo de dicho valor.

c) Armónicos: De las mediciones efectuadas, se concluye que presenta armónicos superiores a dos, valor dentro de lo requerido.

d) Distorsión armónica:

- La distorsión armónica total (DAT) sin carga es de 1.96%.
- La distorsión armónica total (DAT) con carga es de 2.69%.

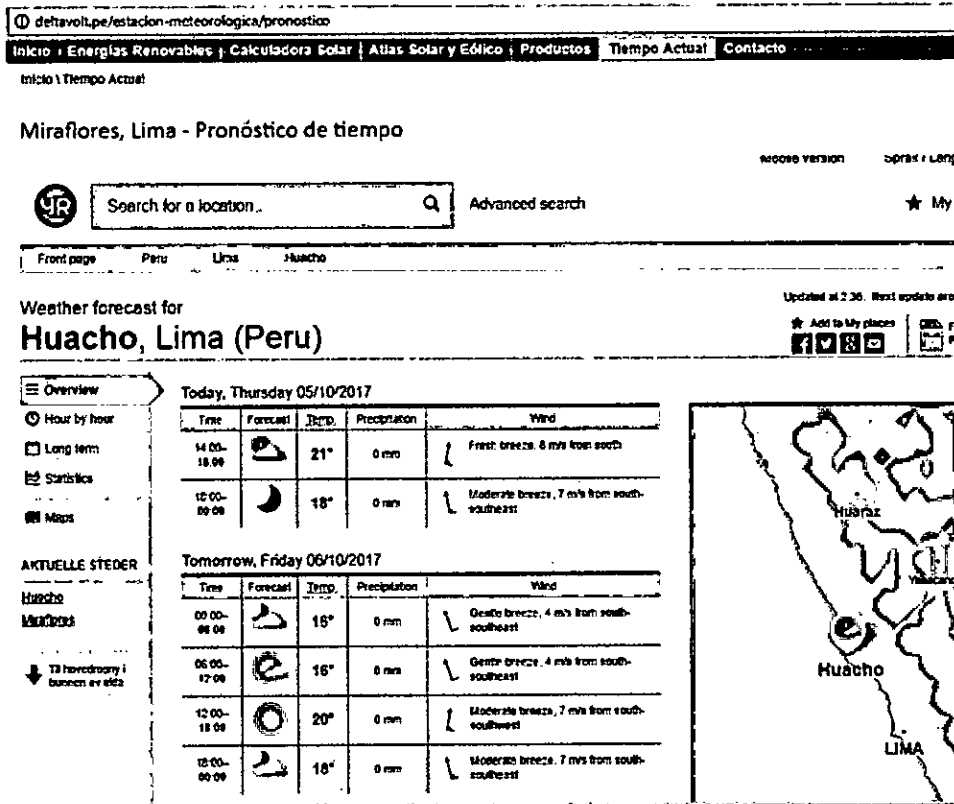
En cualquiera de los casos, es menor al 5%.

c) Medición de las perturbaciones en el sistema

De acuerdo a Delta Volt, el pronóstico del tiempo para Huacho del día 05/10/2017 y del 05/10/2017 se presenta en la Figura N° 4.103.

Figura N° 4.103

PRONÓSTICO DEL TIEMPO PARA HUACHO



Fuente: Delta Volt

De la Figura N° 4.103 se puede observar que el pronóstico el tiempo para Huacho del día 05/10/2017 es de 21°C durante el día, de 18°C en la noche, con una velocidad de viento en el día de 8m/s y en la noche de 7m/s.

Por otro lado, usando el anemómetro AN450, se pudo realizar pruebas durante varios días y horas. Tan solo a manera de ejemplo, en la Tabla N° 4.7 se lista tan solo una pequeñísima parte de las mediciones de temperatura y velocidad de viento realizadas en febrero del año 2016 en el horario indicado.

Tabla N° 4.7
ALGUNOS DATOS DE LAS MEDICIONES DE
TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE VIENTO

Index	---date---	--time--	Temperature	unit	Air_Velocity	unit
1	02-27-2016	16:28:07	29.2	C	5.91	MS
2	02-27-2016	16:28:08	29.2	C	5.91	MS
3	02-27-2016	16:28:09	29.2	C	5.91	MS
4	02-27-2016	16:28:10	29.2	C	6.13	MS
5	02-27-2016	16:28:11	29.2	C	6.13	MS
6	02-27-2016	16:28:12	29.2	C	6.13	MS
7	02-27-2016	16:28:13	29.1	C	5.10	MS
8	02-27-2016	16:28:14	29.1	C	5.10	MS
9	02-27-2016	16:28:15	29.1	C	5.10	MS
10	02-27-2016	16:28:16	29.1	C	5.10	MS
11	02-27-2016	16:28:17	29.2	C	5.22	MS
12	02-27-2016	16:28:18	29.2	C	5.22	MS
13	02-27-2016	16:28:19	29.2	C	5.22	MS
14	02-27-2016	16:28:20	29.1	C	5.02	MS
15	02-27-2016	16:28:21	29.1	C	5.02	MS
16	02-27-2016	16:28:22	29.1	C	5.02	MS

Fuente: elaboración propia

De la Tabla N° 4.7 se puede ver que el 27/02/2016 la temperatura promedio fue 29.1°C y una velocidad promedio de 5.5 m/s.

Los datos según mes y año varían; por lo que el SENAMHI presenta promedios climáticos de temperaturas extremas (máxima y mínima) de las estaciones meteorológicas utilizadas, tal como se muestra en la Tabla N° 4.8 (solo parte del total de estaciones).

Tabla N° 4.8
PROMEDIOS CLIMÁTICOS DE TEMPERATURAS
EXTREMAS DE LAS ESTACIONES
METEOROLÓGICAS UTILIZADAS

N°	CODIGO	ESTACION	TEMPERATURAS EXTREMAS			
			Máxima		Mínima	
			Promedio	Desv.Estánd.	Promedio	Desv.Estánd.
100	110736	Puquio	17,3	1,9	4,2	2,5
101	110737	Andamarca	21,4	2,5	3,2	2,8
102	110741	Cháparra	23,7	1,9	10,7	4,1
103	110743	Coracora	18,2	1,8	5,0	1,8
104	110744	Incuyo	19,4	1,9	-1,9	4,9
105	110745	Pauza	23,2	1,8	8,2	2,5
106	110746	Caraveli	27,3	1,6	10,9	1,9
107	110747	Chalhuanca	24,1	2,6	7,1	3,0
108	110749	Cotahuasi	22,3	1,8	8,6	2,0
109	110754	La Argoskura	14,1	2,2	-3,5	4,4
110	110755	Sibayo	18,2	2,4	-1,4	5,1
111	110756	Combapata	20,0	2,2	3,1	3,1
153	120404	Huánuco	26,2	1,8	13,2	2,0
154	120407	San Jorge	30,7	2,1	20,7	1,7
155	120451	Palmawasi	30,3	2,0	19,9	1,7
156	120502	Surasaca	8,5	1,9	-0,2	1,7
157	120528	Paramonga	23,2	3,4	16,8	2,5
158	120535	Andahuasi	26,3	3,0	14,1	2,7
159	120536	Santa Rosa	26,2	3,7	15,3	2,9
160	120544	La Cantuta	24,8	2,9	13,3	3,0
161	120547	Canta	18,7	1,7	9,2	1,0
162	120606	Quilabamba	30,5	2,5	17,7	1,9
163	120607	Granja Kcayra	20,6	2,1	3,6	4,0
164	120615	Hipólito Urdue	21,5	2,9	17,3	2,4
165	120616	Cafete	23,8	4,0	16,3	2,8
166	120618	Huarangal	23,4	4,0	16,2	3,0
167	120635	Huayao	19,6	2,0	4,2	3,4
168	120638	Pacarán	26,4	2,7	15,2	3,0
169	120708	Puno	14,3	1,8	2,6	2,9
170	120764	Chuqibambilla	16,2	2,0	-1,6	5,4
171	120806	Moquegua	26,3	1,8	11,7	2,3
172	120807	Catana	23,2	2,8	11,04	3,5
173	120836	Characato	22,6	1,8	8,2	2,7
174	120837	Pampa Blanca	24,0	3,4	15,9	2,8

Fuente: Atlas de Energía Solar del Perú

4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos

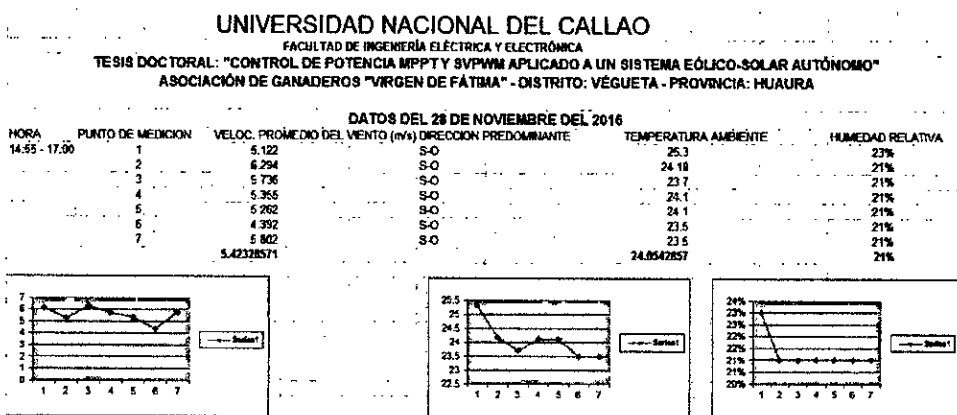
Para el procesamiento estadístico se usó Excel. En tal sentido se pasa a presentar cada uno de ellos:

- **Procesamiento estadístico de la velocidad de viento, temperatura y humedad relativa.**

Se tomaron 7 puntos de medición el día 28 de noviembre del 2016, obteniéndose valores promedio para cada punto, y el promedio total de los 7 puntos, así como el promedio de la temperatura y humedad relativa, tal como puede apreciarse en la Tabla N° 4.9.

Tabla N° 4.9

PROMEDIOS DE LA VELOCIDAD DE VIENTO



Fuente: elaboración propia

De la Tabla N° 4.9 se puede ver que la velocidad promedio de los 7 puntos de medición es de 5.42 m/s con orientación S-O, una temperatura promedio de 24.05 °C, y una humedad relativa promedio de 21%.

Asimismo, en la Tabla N° 4.10 se determinó una desviación estándar de 0.603373492 y una varianza de 0.36405957.

Tabla N° 4.10
DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y VARIANZA DE LA
VELOCIDAD DE VIENTO

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO				
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA				
TÉSIS DOCTORAL: "CONTROL DE POTENCIA MPPT Y SVPWM APLICADO A UN SISTEMA EÓLICO-SOLAR AUTÓNOMO"				
ASOCIACIÓN DE GANADEROS "VIRGEN DE FÁTIMA" - DISTRITO: VÉGUETA - PROVINCIA: HUAURA				
DATOS DEL 28 DE NOVIEMBRE DEL 2016				
HORA	PUNTOS DE MEDICIÓN	VELOC.	PROMEDIO DEL VIENTO (m/s)	
M:55 - 17:00	1		5.122	
	2		6.294	
	3		6.736	PROMEDIO = 5.42378571
	4		5.355	VARIANZA = S^2 0.36405957
	5		5.252	
	6		4.392	DESV. ESTAN = S 0.60337349
	7		5.802	

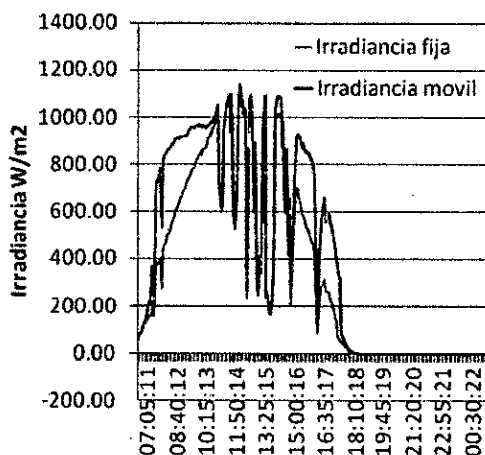
Fuente: elaboración propia

- **Procesamiento estadístico de la radiación solar**

El sábado 8 de julio del 2016, en la Asociación de Ganaderos "Virgen de Fátima", en el distrito: Végueta, provincia: Huaura, se procedió a efectuar mediciones desde las 7:00 A.M hasta las 18:00 horas. Primero se procedió a tomar datos de irradiación o irradiancia (W/m^2), haciendo uso del piranómetro CMP10, tal como se aprecia en la Figura N° 4.104. Paralelamente, al tener conectado al panel solar las etapas de conversión de energía DC-DC (regulador de carga) conectada a una batería solar de 12V, se procedió a la captura de datos de la tensión generada en los terminales de salida del regulador de carga (convertidor DC-DC Buck) y asimismo, se procedió a calcular la potencia generada en función de la corriente y el voltaje sensadas, así como el cálculo de la energía generada tanto para día nublado con panel fijo, día despejado con panel fijo y día despejado con panel móvil. Los resultados se muestran en la Tabla N° 4.11 (primera parte) y Tabla N° 4.12 (segunda y última parte). De dichas tablas podemos observar que el promedio de energía obtenida en un día despejado con panel solar fotovoltaico móvil es más eficiente en un 15% respecto al panel solar fotovoltaico fijo.

Figura N° 4.104

MEDICIONES DE IRRADIACIÓN



Fuente: elaboración propia

Si consideramos la Tabla N° 4.12, la cual muestra datos a partir de las 12:35 horas, podemos obtener en primera instancia la respuesta comparativa de la energía obtenida con panel fijo y con panel móvil, comprobándose que se obtiene mayor energía con el panel móvil (línea color anaranjado), tal como puede apreciarse en la Figura N° 4.105. En segunda instancia podemos obtener la respuesta comparativa de la potencia obtenida con panel fijo y panel móvil, tal como se puede apreciar en la Figura N° 4.106, comprobándose que la eficiencia es mayor con panel móvil (línea color anaranjado).

Tabla N° 4.11
PROMEDIO DE ENERGÍA OBTENIDA CON EL
GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO A ESCALA
(PRIMERA PARTE)

Hora	DIA PROMEDIO (nublado)				DIA PROMEDIO (despejado) (fijo)				DIA PROMEDIO (despejado) (variable)			
	Tensión [V]	Potencia W2/R [watt]	Energía [watt*hora] umbral [0V]	Energía [watt*hora] umbral [12V]	Tensión [V]	Potencia W2/R [watt]	Energía [watt*hora] umbral [0V]	Energía [watt*hora] umbral [12V]	Tensión [V]	Potencia W2/R [watt]	Energía [watt*hora] umbral [0V]	Energía [watt*hora] umbral [12V]
07:00	1.55	1.044565217	0.0870471		0.90	0.35217391	0.02347825		1.04	0.47026087	0.03918841	
07:05	1.58	1.085391304	0.09044328		0.96	0.40062965	0.033391304		1.15	0.56	0.04791667	
07:10	1.3	0.73478909	0.06123188		1.05	0.47934783	0.039946552		1.82	0.75765322	0.06313043	
07:15	1.95	1.633370087	0.13777174		1.25	0.67934783	0.056612319		1.78	1.37765322	0.11479771	
07:20	2.85	3.511521739	0.29429348		1.84	1.472	0.122666667		2.79	2.28004348	0.19000362	
07:25	2.58	2.894080957	0.24117391		2.96	1.80939313	0.317449275		3.11	4.20520887	0.35043841	
07:30	2.51	2.761043478	0.23008095		4.57	9.08039313	0.756699275		4.68	9.52278261	0.79356522	
07:35	2.02	1.774806957	0.14784058		5.09	11.26439313	0.938699275		7.67	25.577826	2.13148188	
07:40	5.62	13.7224783	1.14436232		5.17	12.6212097	0.969828405		8.56	31.8548087	2.65484058	
07:45	5.93	15.2890896	1.27490958		5.68	14.0271304	1.168527536		8.79	33.593087	2.79942391	
07:50	4.57	9.080391304	0.75669928		6.22	16.8210435	1.401753623		9.17	36.5003913	3.04669928	
07:55	4.58	9.120173913	0.76001449		6.85	20.401087	1.70099058		10.62	49.0369957	4.0833913	
08:00	5.72	14.7253913	1.18544928		7.25	22.8532609	1.904438405		11.81	60.6417826	5.05348188	
08:05	9.61	40.1530896	3.34690958		7.62	25.7453913	2.103782609		12.19	64.007	5.38391667	5.38391667
08:10	9.58	39.90278261	3.32523188		8.03	28.0351739	2.316264493		12.3	65.7782609	5.48152174	5.48152174
08:15	9.40	38.4173913	3.20144928		8.42	30.8345217	2.548710345		12.41	66.9800435	5.58000362	5.58000362
08:20	9.66	40.572	3.381		8.82	33.8227826	2.818565217		13.05	74.0445652	6.17038043	6.17038043
08:25	9.03	35.4526522	2.99438043		9.18	36.4401739	3.053347825		13.03	71.8177826	6.15148188	6.15148188
08:30	9.57	39.8195174	3.31829348		9.55	39.8532609	3.304438405		13.03	73.8177826	6.15348188	6.15148188
08:35	9.33	37.84734783	3.15394565		9.85	42.1836957	3.515307971		13.04	73.9111304	6.16092754	6.16092754
08:40	10.03	43.73952174	3.64496058		10.34	44.7041739	3.725347825		13.04	73.9111304	6.16092754	6.16092754
08:45	8.62	32.90620887	2.69218841		10.42	47.3071304	3.933937536		13.07	73.8177826	6.15148188	6.15148188
08:50	8.56	31.8580896	2.65484058		10.66	49.4067826	4.117231884		13.04	73.9111304	6.16092754	6.16092754
08:55	9.32	37.76620887	3.14718841		10.88	51.4671304	4.28927539		13.06	74.158087	6.17964058	6.17964058
09:00	9.54	39.57020887	3.29752174		11.06	53.1841739	4.432014493		13.17	75.4126522	6.28438043	6.28438043
09:05	9.43	38.663	3.22191667		11.22	54.7948087	4.561173913		13.13	74.9551739	6.24620449	6.24620449
09:10	9.82	41.5271304	3.49392754		11.37	56.2073478	4.683945652		13.08	74.3853913	6.19878261	6.19878261
09:15	8.37	30.43952174	2.53829348		11.51	57.6000435	4.800003623		13.09	74.4991739	6.20826449	6.20826449
09:20	8.10	36.00434783	3.0036232		11.63	58.8073478	4.906612319		13.05	74.0445652	6.17038043	6.17038043
09:25	9.80	41.75652174	3.47971034		11.75	60.0271739	5.00264493		13.04	73.9111304	6.16092754	6.16092754
09:30	10.29	46.0365652	3.83638043		11.84	60.9302609	5.07188405		13.02	73.7045217	6.14204348	6.14204348
09:35	9.24	37.1209565	3.0933913		11.92	61.776957	5.148057971		12.99	73.3652609	6.11377174	6.11377174
09:40	10.79	50.8191739	4.21826449		12.01	63.173087	5.22809058	5.22809058	12.97	73.1895217	6.09490014	6.09490014
09:45	10.69	49.68520887	4.14043841		12.09	63.5513478	5.29545652	5.29545652	12.99	73.3852609	6.11377174	6.11377174
09:50	9.84	42.0980896	3.50817391		12.16	64.2093913	5.357449275	5.35744928	12.95	72.9141304	6.07617754	6.07617754
09:55	10.69	49.1290896	4.09490958		12.25	65.2445652	5.437047101	5.4370471	12.95	72.9141304	6.07617754	6.07617754
10:00	10.97	53.3271304	4.39017754		12.31	65.8852609	5.49043841	5.49043841	12.93	72.9141304	6.07617754	6.07617754
10:05	11.09	53.4730896	4.43809058		12.37	66.529087	5.54409058	5.54409058	12.92	72.5769957	6.04825747	6.04825747
10:10	11.89	61.4861304	5.12217754		12.42	67.068	5.589	5.589	12.94	72.8019522	6.0667971	6.0667971
10:15	11.50	57.5	4.79186667		12.47	67.608087	5.63409058	5.63409058	12.94	72.8019522	6.0667971	6.0667971
10:20	11.35	56.00978261	4.64743188		12.50	67.9347826	5.661231884	5.66123188	12.91	72.4647913	6.0389928	6.0389928
10:25	11.37	55.7140896	4.64284058		12.55	68.4793478	5.706612319	5.70661232	12.90	72.3521739	6.02934783	6.02934783
10:30	11.74	59.92904348	4.99375362		12.60	69.0208087	5.752173913	5.75217391	12.91	72.4647913	6.0389928	6.0389928
10:35	11.89	61.4861304	5.12217754		12.64	69.4650435	5.788753623	5.78875362	12.9	72.8521739	6.02934783	6.02934783
10:40	11.45	57.1009565	4.7583913		12.67	69.7951739	5.816264493	5.81626449	12.89	72.2400435	6.02000362	6.02000362
10:45	10.92	51.84620887	4.32052174		12.67	69.7951739	5.816264493	5.81626449	12.89	72.128	6.01066667	6.01066667
10:50	11.61	58.60520887	4.88177174		12.69	70.0156957	5.824641304	5.8246413	12.86	71.9041739	5.99203449	5.99203449
10:55	11.72	59.72104348	4.97675362		12.69	70.0156957	5.824641304	5.8246413	12.84	71.6806957	5.9733913	5.9733913
11:00	12.27	65.45778261	5.45481522	5.45481522	12.69	70.0156957	5.824641304	5.8246413	12.83	71.589087	5.96409058	5.96409058
11:05	12.12	63.8671304	5.32220887	5.32220887	12.69	70.0156957	5.824641304	5.8246413	12.83	71.7323913	5.9820928	5.9820928
11:10	11.61	58.60520887	4.88377174		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.82	71.4576522	5.9547971	5.9547971
11:15	12.69	70.0156957	5.8246413		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.82	71.4576522	5.9547971	5.9547971
11:20	11.76	60.1293913	5.01078261		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.80	71.2347826	5.93623188	5.93623188
11:25	11.58	58.30278261	4.85856522		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.83	71.4576522	5.9547971	5.9547971
11:30	11.81	60.64178261	5.05348188		12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.80	71.2347826	5.93623188	5.93623188
11:35	12.27	65.45778261	5.45481522	5.45481522	12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.83	71.569087	5.96409058	5.96409058
11:40	12.87	72.01604348	6.00133696	6.00133696	12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.79	71.1235217	5.92898014	5.92898014
11:45	12.38	66.6369565	5.55305797	5.55305797	12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.78	70.9012609	5.90843841	5.90843841
11:50	12.33	66.09952174	5.50829348	0.499028405	12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.75	70.6793478	5.8894565	5.8894565
11:55	11.97	62.2904348	5.19133696		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.75	70.6793478	5.8894565	5.8894565
12:00	11.47	57.2003913	4.76699928		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.74	70.5685217	5.88071034	5.88071034
12:05	11.62	58.70620887	4.89218841		12.68	69.9053913	5.825449275	5.82544928	12.77	70.9012609	5.90843841	5.90843841
12:10	11.65	59.00978261	4.91748188		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.74	70.5685217	5.88071034	5.88071034
12:15	12.30	65.77826087	5.48152174	5.48152174	12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.75	70.6793478	5.8894565	5.8894565
12:20	11.75	60.0271739	5.0026449		12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.80	71.2347826	5.93623188	5.93623188
12:25	11.95	62.08904348	5.17409058		12.71	70.2365652	5.853047101	5.8530471	12.81	71.3461304	5.94351087	5.94351087
12:30	11.70	59.5173913	4.99978261		12.70	70.126087	5.84384058	5.84384058	12.80	71.2347826	5.93623188	5.93623188
TOTAL PARCIAL 1		296.669457	31.7268128				784.8861411	700.614569			386.070957	326.649598

Fuente: elaboración propia

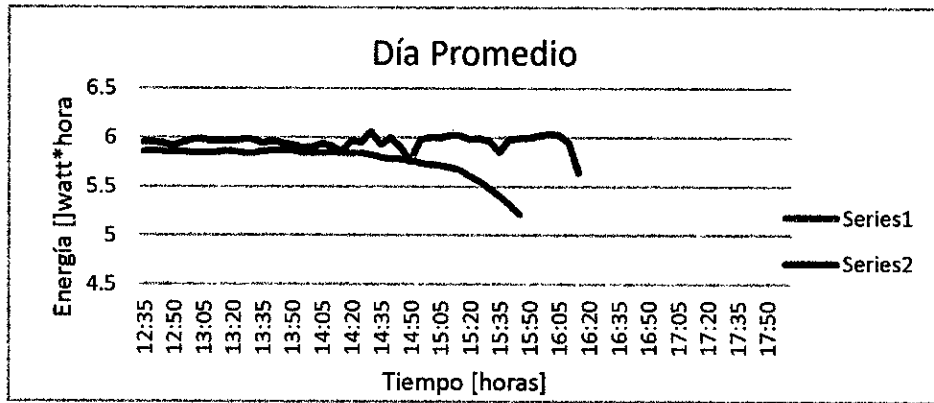
Tabla N° 4.12

PROMEDIO DE ENERGÍA OBTENIDA CON EL GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO A ESCALA (SEGUNDA PARTE)

Hora	DIA PROMEDIO (marchado)			Energía (watt*hora) umbral (LPM)	DIA PROMEDIO (marchado) [12]			Energía (watt*hora) umbral (LPM)	DIA PROMEDIO (marchado) [verbalde]			Energía (watt*hora) umbral (LPM)
	Tensión (V)	Potencia VA/Ph (watt)	Energía (watt*hora) umbral (LPM)		Tensión (V)	Potencia VA/Ph (watt)	Energía (watt*hora) umbral (LPM)		Tensión (V)	Potencia VA/Ph (watt)	Energía (watt*hora) umbral (LPM)	
12:01	11.91	61.47308796	5.13942399		12.72	70.3471304	5.80220087	5.80220087	12.62	70.4575643	5.9047971	5.9047971
12:02	12.05	71.90417792	5.99201449	5.99201449	12.71	70.4577826	5.87143188	5.87143188	12.62	70.4575623	5.9047971	5.9047971
12:03	11.98	54.80320887	4.68218941		12.72	70.3471304	5.80220087	5.80220087	12.61	71.0461304	5.90551087	5.90551087
12:04	12.00	48.85217791	4.07701649		12.71	70.2568463	5.8330471	5.8330471	12.78	70.6173478	5.91789645	5.91789645
12:05	9.41	38.49917791	3.20126649		12.72	70.3471304	5.80220087	5.80220087	12.62	71.4575643	5.9547971	5.9547971
12:06	10.00	43.47620087	3.63118941		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.65	71.4575623	5.9547971	5.9547971
12:07	9.9	43.6130478	3.53108796		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.65	71.4575623	5.9547971	5.9547971
12:08	9.27	31.8631304	2.11511087		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.61	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:09	9.31	37.68520087	3.0265797		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.61	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:10	8.37	38.1720087	3.1810471		12.72	70.3471304	5.80220087	5.80220087	12.61	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:11	10.04	41.6297087	3.63771087		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.61	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:12	8.43	30.43451794	2.50571014		12.69	70.0150957	5.8346413	5.8346413	12.61	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:13	10.1	46.35217791	4.09970449		12.72	70.3471304	5.80220087	5.80220087	12.61	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:14	10.64	49.221087	4.3017971		12.71	70.4577826	5.87143188	5.87143188	12.61	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:15	10.33	48.39517791	3.98025449		12.71	70.4577826	5.87143188	5.87143188	12.61	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:16	10.53	43.208087	3.62174297		12.71	70.4577826	5.87143188	5.87143188	12.79	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:17	11.67	53.2007913	4.44002087		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.76	70.990087	5.97918941	5.97918941
12:18	10.62	49.0305087	4.0839113		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.76	70.990087	5.97918941	5.97918941
12:19	10.46	47.0206087	3.96428941		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.80	71.2347087	5.97918941	5.97918941
12:20	10.70	49.778087	4.34318941		12.71	70.2084632	5.8330471	5.8330471	12.71	71.2347087	5.97918941	5.97918941
12:21	10.55	48.3927913	4.03279796		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.71	70.236547	5.97918941	5.97918941
12:22	10.70	49.778087	4.34318941		12.69	70.0150957	5.8346413	5.8346413	12.61	71.2347087	5.97918941	5.97918941
12:23	11.01	52.8900449	4.40803087		12.70	70.120087	5.81384058	5.81384058	12.62	71.2347087	5.97918941	5.97918941
12:24	12.46	67.30009087	5.6265797	5.6265797	12.68	69.8053913	5.8254978	5.8254978	12.57	72.890087	6.02742391	6.02742391
12:25	12.14	64.078087	5.1784058	5.1784058	12.65	69.575	5.79791667	5.79791667	12.79	71.2347087	5.97918941	5.97918941
12:26	12.26	65.83118941	5.44332754	5.44332754	12.63	69.3517791	5.77957813	5.77957813	12.87	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:27	12.63	67.34318941	5.7044978	5.7044978	12.61	69.13117791	5.75927813	5.75927813	12.76	70.990087	5.97918941	5.97918941
12:28	11.2	54.5391304	4.54497754		12.62	69.3053913	5.7704978	5.7704978	12.80	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:29	10.10	44.85717791	3.69004449		12.59	68.9156304	5.7400471	5.7400471	12.81	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:30	10.63	49.3141304	4.10911087		12.57	68.677826	5.72681572	5.72681572	12.87	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:31	10.34	46.4890449	3.97273087		12.56	68.459217	5.71571014	5.71571014	12.87	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:32	9.99	43.491304	3.61194808		12.54	68.2406087	5.69752174	5.69752174	12.81	72.340043	6.02002087	6.02002087
12:33	10.08	44.1769087	3.68139113		12.51	68.043217	5.6792948	5.6792948	12.81	72.340043	6.02002087	6.02002087
12:34	11.21	54.7408087	4.54317791		12.44	67.28417791	5.6703449	5.6703449	12.81	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:35	7.03	25.4445087	2.1303043		12.38	66.6369977	5.5395797	5.5395797	12.88	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:36	8.70	40.9089087	3.40905797		12.30	65.77826087	5.48152174	5.48152174	12.81	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:37	9.22	36.56017791	3.08021649		12.21	64.81817791	5.40197813	5.40197813	12.71	70.236547	5.97918941	5.97918941
12:38	9.04	35.3118941	2.96927754		12.12	63.8671304	5.3226087	5.3226087	12.63	71.927913	5.9609929	5.9609929
12:39	8.85	32.53152174	2.7109087		12.00	62.608087	5.2177913	5.2177913	12.80	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:40	8.56	31.438087	2.6348087		11.89	61.1543478	5.09630713	5.09630713	12.88	71.9401304	5.9609929	5.9609929
12:41	8.39	30.602087	2.55048087		11.68	59.314087	4.9428058	4.9428058	12.89	72.340043	6.02002087	6.02002087
12:42	8.19	29.1632174	2.43009087		11.48	57.80217791	4.7950449	4.7950449	12.91	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:43	8.00	27.800087	2.3189087		11.25	55.02717791	4.58397813	4.58397813	12.90	72.016043	6.00118941	6.00118941
12:44	7.71	25.843087	2.15377174		10.97	52.8721304	4.36017754	4.36017754	12.82	67.217963	5.9437971	5.9437971
12:45	7.76	25.843087	2.15377174		10.34	45.992087	3.79918941	3.79918941	12.63	67.217963	5.9437971	5.9437971
12:46	7.39	21.4467087	1.85304449		8.69	22.810087	2.7369058	2.7369058	11.44	56.9016087	4.7617971	4.7617971
12:47	6.21	14.787	1.19725		6.99	21.343217	2.7029348	2.7029348	9.59	59.981304	5.12117754	5.12117754
12:48	4.89	10.3905087	0.8608304		5.33	12.4449087	1.2370471	1.2370471	6.60	30.40043	2.70002087	2.70002087
12:49	4.63	9.02017804	0.77869929		3.93	6.71517791	0.539397813	0.539397813	4.66	9.4415632	0.7987971	0.7987971
12:50	4.34	7.81847826	0.65180713		2.71	3.2409913	0.7001297	0.7001297	3.43	5.175	0.431125	0.431125
12:51	4.07	7.2021304	0.60017754		2.11	1.9138956	0.3118077	0.3118077	2.71	3.11008087	0.26008087	0.26008087
12:52	4.27	7.97747826	0.68081232		1.77	1.9671804	0.11831087	0.11831087	2.78	2.90217791	0.18347813	0.18347813
12:53	3.99	6.971762087	0.57481527		1.44	0.9247203	0.07721189	0.07721189	1.81	1.0409913	0.1189929	0.1189929
12:54	3.44	5.14500478	0.42872852		1.11	0.7461804	0.06217754	0.06217754	1.47	0.81952174	0.07829348	0.07829348
12:55	3.44	5.14500478	0.42872852		1.22	0.8471804	0.05932754	0.05932754	1.31	0.7461804	0.06217754	0.06217754
12:56	3.29	4.7061304	0.39217754		1.16	0.5850449	0.04875348	0.04875348	1.23	0.81952174	0.07829348	0.07829348
12:57	3.14	4.288762087	0.35722189		1.34	0.5450449	0.04708087	0.04708087	1.13	0.55517791	0.04608087	0.04608087
12:58	2.87	3.5812087	0.2984304		1.12	0.4653913	0.0454632	0.0454632	1.07	0.4977826	0.04148125	0.04148125
12:59	2.71	3.1708087	0.2689087		1.09	0.5189452	0.04804713	0.04804713	1.04	0.4977826	0.04148125	0.04148125
13:00	2.77	3.3300449	0.27891649		1.08	0.48852174	0.0472034	0.0472034	1.02	0.4721478	0.0379929	0.0379929
13:01	2.71	3.24017804	0.27002087		1.02	0.45327813	0.03789087	0.03789087	0.99	0.442118941	0.0350087	0.0350087
13:02	2.54	2.80500478	0.23773087		1.00	0.4347826	0.03632189	0.03632189	0.97	0.40908087	0.0340087	0.0340087
13:03	2.55	2.90108087	0.24342189		0.96	0.40009087	0.033913	0.033913	0.93	0.37829348	0.03178087	0.03178087
13:04	2.18	2.0832087	0.17177174		0.97	0.40908087	0.0340087	0.0340087	0.90	0.3517791	0.0273478	0.0273478
13:05	2.01	1.79189632	0.14918087		0.94	0.38417791	0.03201449	0.03201449	0.87	0.33208087	0.02622913	0.02622913
13:06	1.76	1.346762087	0.11271189		0.92	0.368	0.0308087	0.0308087	0.84	0.3067826	0.02528125	0.02528125
TOTAL PARCIDA 2		183.20827	78.1717999			254.54874	724.716478			778.808715	267.884	
TOTAL (TOTAL P1 + TOTAL P2)		418.734794	83.8003221			544.717951	475.571298			626.013121	382.51758	

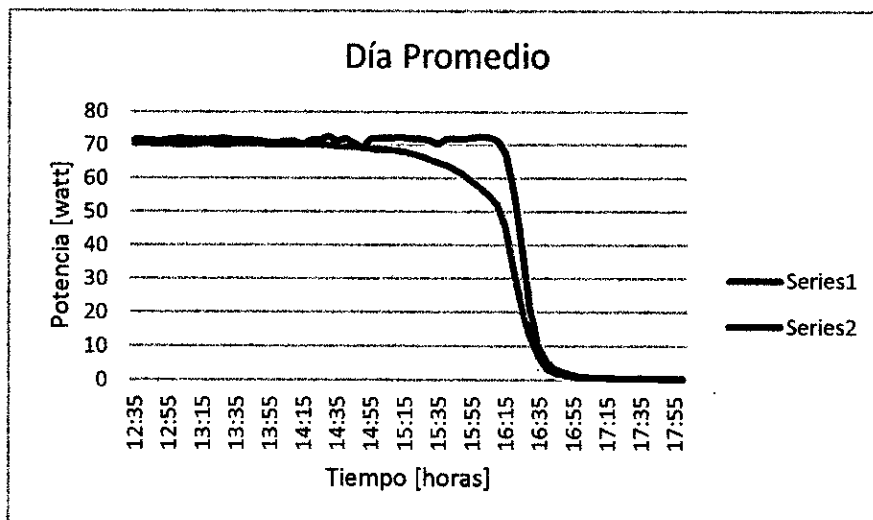
Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.105
COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON
PANEL FIJO Y CON PANEL MÓVIL



Fuente: elaboración propia

Figura N° 4.106
COMPARACIÓN DE LA POTENCIA INSTANTÁNEA
OBTENIDA CON PANEL FIJO Y CON PANEL
MÓVIL



Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 Resultados de Simulación para el sistema original

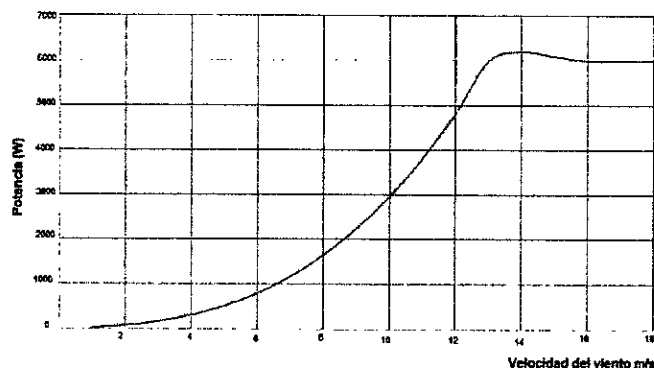
En el presente capítulo se presentan los resultados del diseño del sistema eólico-solar del sistema original (de pequeña potencia), así como los resultados del diseño del prototipo del subsistema solar fotovoltaico.

En tal sentido, los resultados gráficos que se presentan en este capítulo, vienen a ser una réplica resumida de los ya obtenidos en el capítulo IV.

5.1.1 Simulación del generador eólico síncrono de imanes permanentes

En la Figura N° 5.1 se puede observar que la potencia generada por el generador eólico se incrementa a medida que varía la velocidad, y cuando llega a una velocidad de 14 m/s la potencia ligeramente baja y se mantiene en 6,000 W, exactamente la potencia que indica entre las características eléctricas de GSIP.

Figura N° 5.1
POTENCIA GENERADA POR EL GENERADOR
EÓLICO



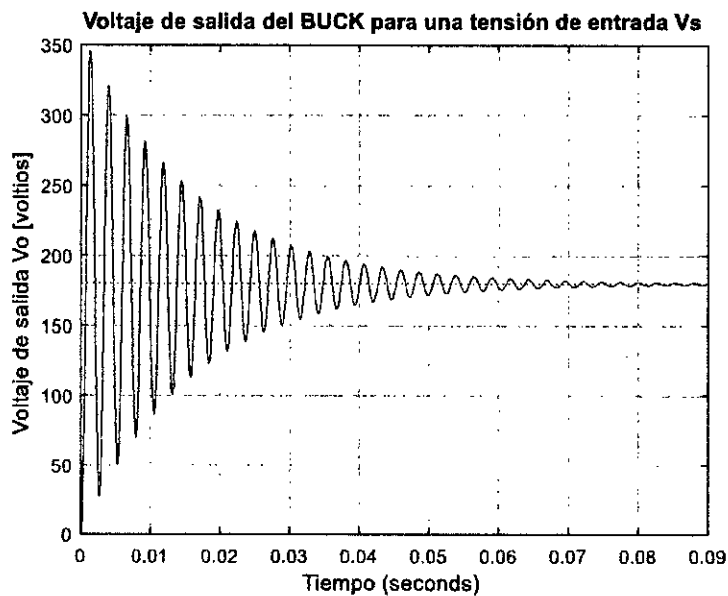
Fuente: elaboración propia

5.1.2 Simulación de la estrategia de Control MPPT para los convertidores DC/DC Buck y Boost

Convertidor Buck

Usando Matlab, para $V_s=218$; $V_o=180$; $f=5000$; $r=0.005$; $R=10$; $T=1/f$; $U=V_o/V_s$; se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura 5.2

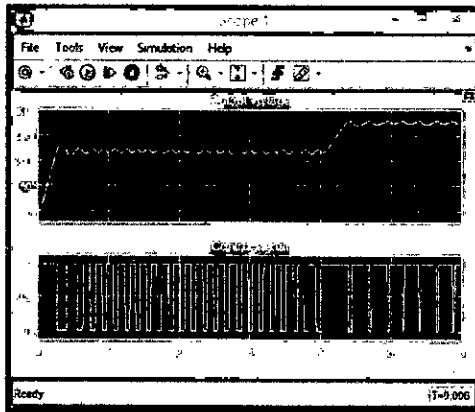
Figura N° 5.2
VOLTAJE DE SALIDA DEL BUCK PARA UNA
TENSIÓN DE ENTRADA V_s Y CICLO DE SERVICIO
 $U=0.8257$, USANDO CONTROL PID



Fuente: elaboración propia

Usando Simulink, considerando los mismos datos, y tan solo seleccionando la salida (Voltaje de referencia) con escalones que va de 120 V a 180 V, obtendremos en la salida una adecuada respuesta, tal como se muestra en la Figura N° 5.3.

Figura N° 5.3
VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR
BUCK EN LA PLATAFORMA SIMULINK

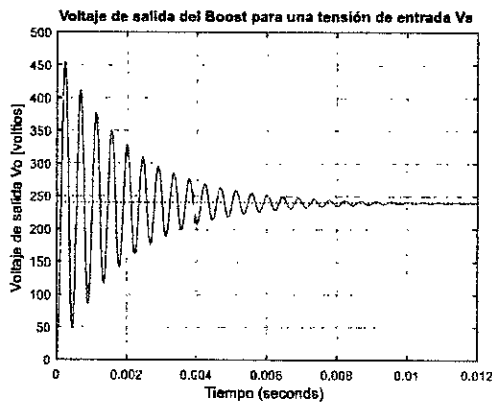


Fuente: elaboración propia

Convertidor Boost

Para: $V_s = 180$; $V_o = 240$; $f = 25000$; $R = 25$; $r = 0.01$ (rizado); $U = 0.2$, el resultado gráfico se muestra en la Figura N° 5.4.

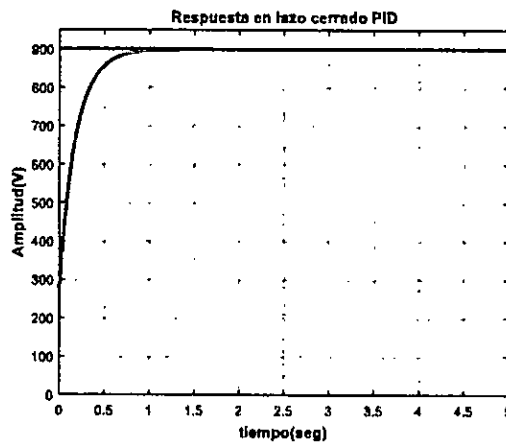
Figura N° 5.4
VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DE LAS
VARIACIONES DEL VOLTAJE DE ENTRADA, USANDO
CONTROL PID



Fuente: elaboración propia

Ahora, considerando $V_s = 180\text{VDC}$, $U = 0.8$, se encuentra $V_o = 900\text{ VDC}$, lo que se muestra en la Figura 5.5.

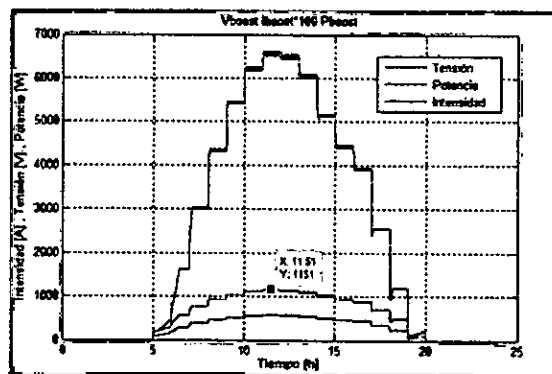
Figura N° 5.5
RESPUESTA GRÁFICA DEL
CONTROLADOR PID PARA $U = 0.8$



Fuente: elaboración propia

Usando los mismos datos, con el Control MPPT P&O se consigue el resultado mostrado en la Figura 5.6.

Figura N° 5.6
RESPUESTA EN POTENCIA, INTENSIDAD Y TENSIÓN
DE CONTROL MPPT, USANDO MPPT P&O

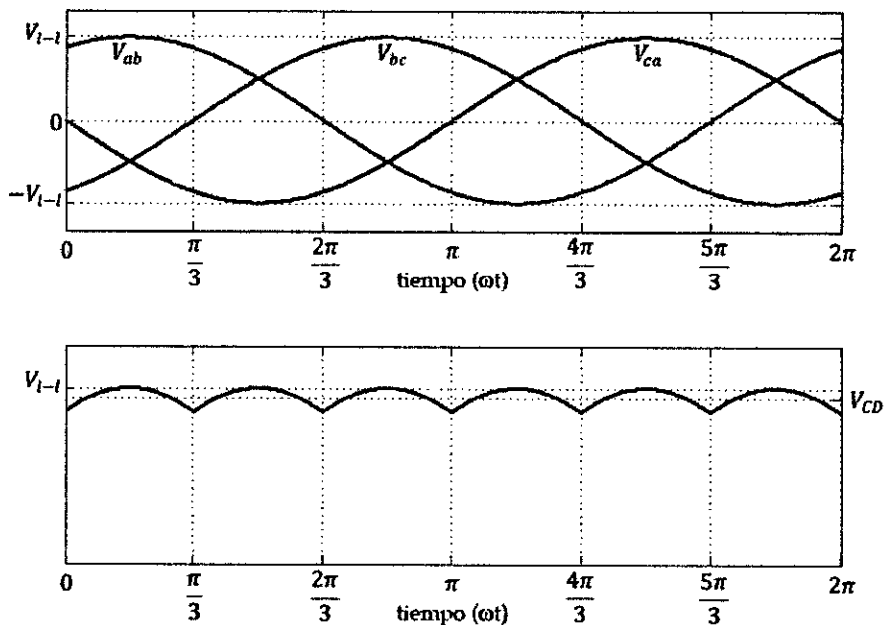


Fuente: elaboración propia

5.1.3 Simulación de la etapa de conversión AC/DC (rectificador trifásico).

Las señales trifásicas provenientes del generador son las entradas al rectificador trifásico no controlado, y producen a su salida una señal rectificada o continua con bajo rizo, como se presenta en la Figura N° 5.7.

Figura N° 5.7
SALIDA DE TENSIÓN Y RIZADO DEL
RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO

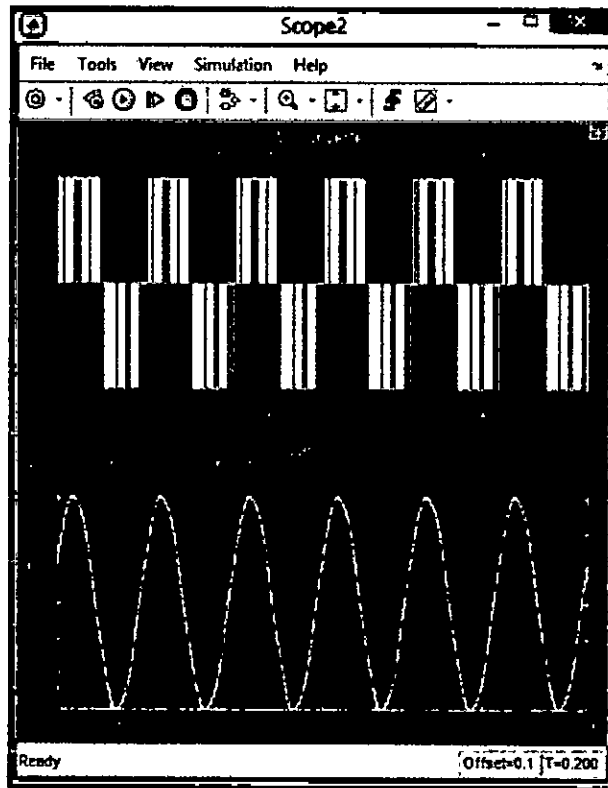


Fuente: elaboración propia

5.1.4 Simulación de la estrategia de Control SVPWM para los convertidores DC/AC (inversores trifásicos)

En la Figura N° 5.8 se puede observar que la tensión a la salida del inversor es de aproximadamente 300 VAC a 60 Hz, para una tensión de entrada de 260 VDC. Con una tensión DC de 230 V se consigue una tensión de 220 VAC a la salida del inversor.

Figura N° 5.8
TENSIÓN DE SALIDA DEL INVERSOR



Fuente: elaboración propia

5.2 Resultados del Prototipo Solar fotovoltaico

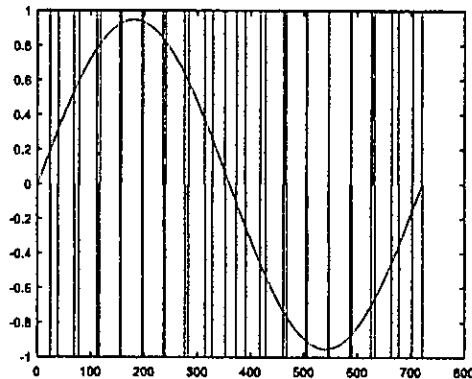
5.2.1 Resultados de simulación de la estrategia de Control MPPT para los convertidores BUCK y BOOST mediante Matlab-Simulink

Son similares que para el sistema original; pero de menor potencia. Los programas se incluyen en los Anexos G y H.

5.2.2 Resultados de simulación de la estrategia de Control SPWM para los convertidores DC/AC (inversores), mediante Matlab-Simulink

Al implementar el control SPWM para el inversor, mediante el programa spwm.m, se obtienen los resultados mostrados en la Figura N° 5.9.

Figura N° 5.9
TENSIÓN DE SALIDA DEL INVERSOR
APLICANDO CONTROL SPWM



Fuente: elaboración propia

El programa se incluye en el Anexo J.

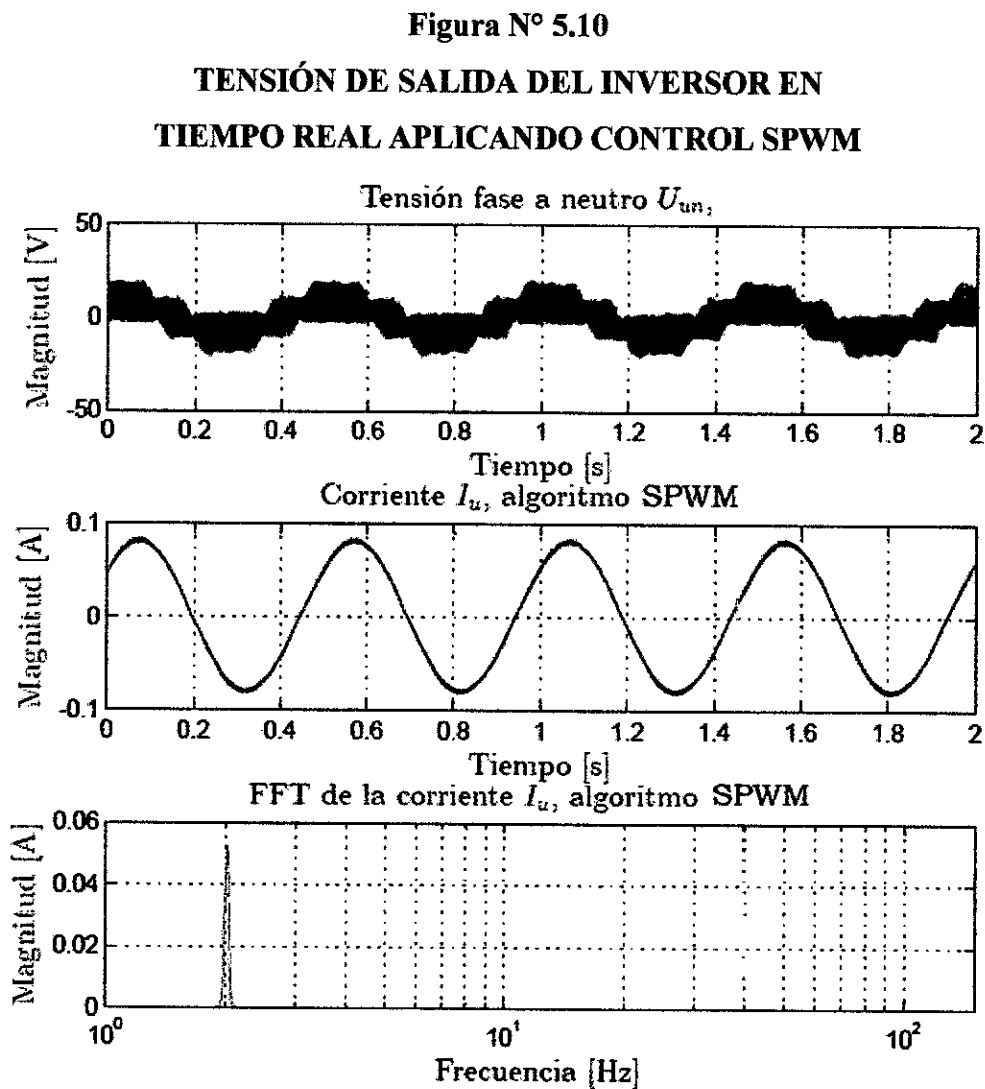
5.2.3 Resultados en tiempo real de la estrategia de Control SPWM para los convertidores DC/AC (inversores), en código Arduino

Al implementar el algoritmo de control SPWM en el Arduino UNO, se tuvo inconvenientes, debido a la longitud del código, así como al uso de operaciones matemáticas y funciones trigonométricas. En consecuencia, se hizo necesario reducir la frecuencia de muestreo a 250Hz, lo que redundó a que el rango de frecuencias de la onda senoidal de salida se reduzca hasta los 20 Hz.

Por lo tanto, se consideró a modo de prueba, utilizar los siguientes parámetros:

- Frecuencia de muestreo: 250 Hz.
- Frecuencia de la onda senoidal deseada: 2 Hz.
- Tensión de alimentación: 30 VDC

La respuesta en tiempo real del control SPWM del inversor se muestra en la Figura 5.10.

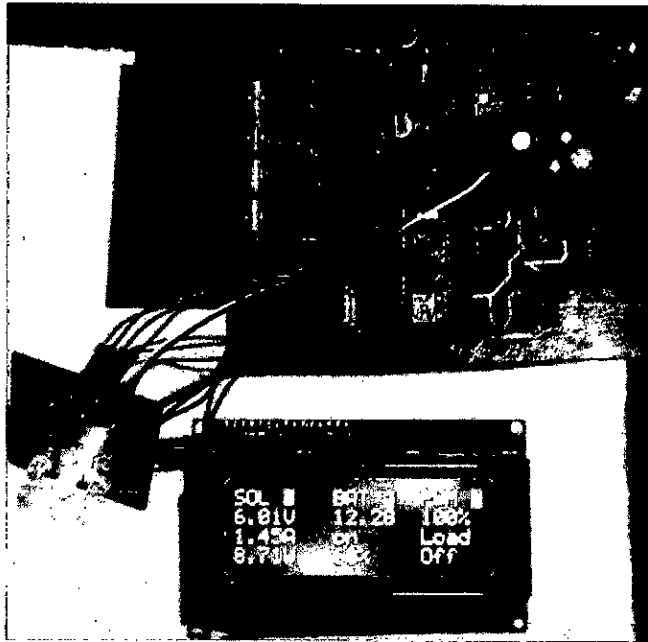


Fuente: elaboración propia

5.2.4 Resultados en tiempo real de la estrategia de Control MPPT para el convertidor BUCK mediante Arduino

En la Figura 5.11 se puede apreciar la lectura del regulador de carga (convertidor DC/DC Buck). El programa en código Arduino se presenta en el Anexo K.

Figura N° 5.11
LECTURA DEL CONVERTIDOR DC/DC
BUCK



Fuente: elaboración propia

5.2.5 Resultados en tiempo real de la estrategia de Control PID para el convertidor Boost mediante Arduino

Son similares que para el sistema original; pero de menor potencia. Los programas se incluyen en el Anexo L.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los resultados gráficos presentados en el Capítulo V, podemos anotar:

1. De la Figura N° 5.1 se puede observar que la potencia generada por el generador eólico se incrementa a medida que varía la velocidad, y cuando llega a una velocidad de 14 m/s la potencia ligeramente baja y se mantiene en 6,000 W, exactamente la potencia que indica entre las características eléctricas de GSIP, lo cual indica que el criterio de control se está cumpliendo, entendiéndose que el generador debe generar normalmente potencias que respondan a las variaciones de velocidad de viento, hasta un rango máximo de 14 m/s, y por encima del cual la potencia ligeramente baja hasta mantenerse en 6,000 W.

2. De la Figura N° 5.2 se puede apreciar que el convertidor Buck con Control PID logra obtener una tensión de 180VDC a partir de una tensión de entrada de 218 V, con un rizo muy pequeño. Asimismo, de la Figura N° 5.4 se puede observar que el convertidor Boost con Control PID logra obtener en su salida una tensión de 240 V para una entrada de 180V, y finalmente, de la Figura N° 5.6 se puede observar que la potencia, intensidad y tensión generada con el algoritmo MPPT es más eficiente que el PID.

3. De la Figura N° 5.7 podemos decir que la gráfica generada está acorde con el comportamiento de un circuito rectificador trifásico puente completo.

4. De la Figura N° 5.8 podemos decir que a nivel de simulación la tensión de salida del inversor trifásico con Control SVPWM es senoidal pura, cumpliendo así con los requerimientos de diseño, tanto a nivel de tensión como en frecuencia.
5. En referencia al prototipo del generador solar fotovoltaico, de la Figura N° 5.9, a nivel de simulación, podemos observar que la tensión de salida del inversor es sinusoidal puro, y de la Figura N° 5.10, en tiempo real, podemos observar que la forma de onda de la tensión de salida del inversor es también senoidal puro, y con una corriente también senoidal pura. Asimismo, usando la FFT, la mayor componente se encuentra a 2 Hz y los componentes armónicos son de muy baja amplitud, prácticamente despreciables.
6. De la Figura N° 5.11 se puede apreciar que la lectura del display del convertidor DC/DC Buck en tiempo real con control MPPT, muestra 6V para el panel y para la carga, y una tensión en la batería de 12 V. Estas lecturas se dieron en horas de la tarde (en el poniente), lo cual es razonable, debido a la baja radiación solar en horas de la tarde.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

De la discusión de resultados expuestos en el Capítulo VI, podemos concluir que:

1. El generador eólico (GSIP) logra incrementar su potencia a medida que varía la velocidad del viento, hasta un rango ligeramente menor de 14 m/s. Para velocidades iguales o superiores a 14 m/s se produce un frenado, protegiendo así al sistema del embalamiento.
2. La respuesta del control PID aplicado a los convertidores Buck y Boost, es buena, presentando rizados de tensión de salida muy pequeña; mientras que el control MPPT es más eficiente que el PID.
3. La respuesta del circuito rectificador trifásico no controlado es la esperada.
4. La respuesta a nivel de simulación del inversor trifásico presenta una forma de onda senoidal pura, cumpliendo así con los requerimientos de diseño.
5. En relación al prototipo de generador solar fotovoltaico, podemos concluir que tanto a nivel de simulación como en tiempo real, la respuesta del inversor con control SPWM es muy buena, con formas de onda senoidal pura tanto para corriente como para voltaje, con un DAT de 2.69% a plena carga, y con un DAT de 1.96% sin carga, valores por debajo del 5%.
6. Las lecturas en voltaje del convertidor DC/DC Buck en tiempo real con control MPPT, guarda relación con el nivel de radiación solar, que es mayor a primeras horas del día, en el que podemos medir tensiones mayores que llegan hasta los 21 voltios (para el panel en uso).

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

En primera instancia sería recomendable adquirir un generador eólico de pequeña potencia, que en conjunto con el módulo de generador solar representarían un esfuerzo para motivar el desarrollo de proyectos en energías renovables, y así comprometer a docentes y alumnos en el desarrollo de proyectos de importancia nacional.

Asimismo, sería recomendable aplicar diferentes algoritmos de control modernos al sistema solar fotovoltaico, tales como Control Óptimo, Control Adaptivo, Control Predictivo, etc., y algoritmos de inteligencia artificial, tales como, Lógica Difusa y Redes Neuronales.

CAPÍTULO IX

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bretón A. (2003). Diseño y Construcción de un Inversor Trifásico Multinivel de Cuatro Etapas para Compensación Armónica y de Reactivos. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [2] Bueno A. (2012). Electrónica de Potencia: Aspectos Generales y Convertidores Electrónicos. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela: [s.n.].
- [3] Campos D. (2006). Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 9 (1-9).
- [4] Carranza O. (2012). Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost Trifásicos con filtro LCL para reducción de la distorsión armónica en corriente, aplicadas al procesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes operando a velocidad variable. Universidad Politécnica de Valencia, España: [s.n.].
- [5] Carrillo Gonzales, C.J. (2001). Análisis y Simulación de Sistemas Eólicos Aislados. Vigo, España: [s.n.].
- [6] Carta, G., Calero R., Colmenar A., Castro M. (2009). Centrales de Energías Renovables (primera edición). Madrid, España: Pearson Educación.
- [7] Córdova S., Ospina S. (2015). Construcción de Módulo Convertidor CC-CC Elevador, para Prácticas en el Laboratorio del Programa Ingeniería Mecatrónica Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [8] Delgado M. (2012). Diseño e implementación experimental de un inversor monofásico operando en modo isla. Universidad Carlos III, España.

- [9] Delta Volt (2016). Paneles Solares, Tipos y Eficiencias (2016).
- [10] Deutechno (2014). Proyecto de Aerogenerador Piezoeléctrico por Vorticidad. Recuperado el 08 de febrero del 2017, de www.vortexbladeless.com/pdf/15.pdf
- [11] Erickson R., Maksimovic D. (2004). Fundamentals of Power Electronics. (second edition). New York, EE.UU: Kluwer Academic Publishers.
- [12] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, dena German Energy Agency (2017). Energy Renewables – Made in Germany (2017).
- [13] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, MITTELSTAND GLOBAL ENERGY SOLUTIONS MADE IN GERMANY (2017). energy solutions – made in Germany. Druck- und Verlagshaus Zarbock, Germany: GmbH & Co. KG, Frankfurt.
- [14] Fernández Díez, P. (2000). Energía Eólica. Universidad de Cantabria, España: [s.n].
- [15] Gamboa J. (2008). Guía de Diseño y Análisis de Convertidores Conmutados de Alta Frecuencia. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica: [s.n].
- [16] Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria OSINERGMIN (2014). Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Perú. Lima, Perú: OSINERGMIN.
- [17] Grauers, A. (1996). Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines. Technical Report N° 292. Chalmers University of Technology, Göteborg (1996).

- [18] Guardado D., Rivera V. (2012). Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. Universidad de El Salvador.
- [19] Maldonado G. (2013). Diseño e implementación de un inversor multinivel, de cinco niveles. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20] Martínez de Alegría, I., Astarloa A., Cuadrado, C. (2012). Electrónica Industrial: Prácticas. Universidad del País Vasco, España: [s.n.].
- [21] Micolau E. (2016). Desarrollo de una aplicación en Matlab para la evaluación de algoritmos MPPT y GMPPT. Escola Universit ria d'Enginyeria Técnica Industrial de Barcelona, España.
- [22] Ministerio de Energías y Minas (2016). Atlas Eólico del Perú (1era. edición). Lima, Perú: [s.n.].
- [23] Ministerio de Energía y Minas (2010). Propuesta de Política Energética de Estado Perú 2010-2040. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas.
- [24] Ministerio de Energía y Minas (2015). Balance Nacional de Energía 2015. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas.
- [25] Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. (2009). Electrónica de Potencia, Convertidores, aplicaciones y diseño (3era. edición). México: Mc Graw Hill Educación.
- [26] Morales Caporal, R., Bonilla Huerta, E. (2010). Control Predictivo de un Sistema de Generación Eléctrica con Energías Eólica y Solar para Lugares Aislados. Apizaco, México: [s.n.].
- [27] OSINERGMIN (2016). Exitoso proceso conducido por OSINERGMIN. Lima, Perú: OSINERGMIN.

- [28] Paredes V. (2014). Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos. Universidad de Valladolid, España.
- [29] Pérez F. (2016). Análisis de dos Metodologías para Operar un Sistema Solar Fotovoltaico en el Punto de Máxima Transferencia de Potencia. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [30] Prats M. (2003). Nuevas Técnicas de Modulación Vectorial para Convertidores Electrónicos de Potencia Multinivel. Universidad de Sevilla, España: [s.n].
- [31] Ragheb, M. (2013). Historical Wind Generators Machines. Cleveland, USA: [s.n].
- [32] Rashid M. (1995). Electrónica de Potencia. (2da. edición). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- [33] Revista on line: Ecología Verde (2017). Nuevas Tecnologías Solares que probablemente no conoces.
- [34] Rojas E. (2013). Implementación del algoritmo de modulación de ancho de pulso por vector espacial adaptativo. Universidad de Costa Rica.

Anexo A: Matriz de Consistencia

Título: "CONTROL DE POTENCIA MPPT Y SVPWM APLICADO A UN SISTEMA EÓLICO-SOLAR AUTÓNOMO"

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p>Problema General</p> <p>¿De qué manera las técnicas de Control MPPT y SVPWM permitirán optimizar la generación de energía del sistema eólico-solar?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>El objetivo general de este proyecto de tesis es determinar en qué medida la aplicación de técnicas de control MPPT y SVPWM permiten optimizar la generación de energía del sistema.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>"La aplicación de algoritmos de Control MPPT y SVPWM, permitirán mejorar la eficiencia en la generación y calidad de la energía disponible del generador eólico-solar".</p>	<p>Variables independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Variable X: Técnicas de Control MPPT y SVPWM. <p>Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Señales de control PWM generados por el controlador MPPT para los convertidores DC/DC Buck y Boost. • Señales de Control SVPWM para el convertidor DC/AC (Inversor). <p>Variables dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Variable Y: Potencia y calidad de energía generada. Los indicadores son: <ul style="list-style-type: none"> • Potencia generada en DC y AC. • El voltaje generado en la etapa de alterna. • La frecuencia generada por la red trifásica. <p>Variables interviniendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Variable Z: Perturbaciones presentes en el sistema. Los indicadores son: <ul style="list-style-type: none"> • Variaciones de la humedad relativa. • La turbulencia del viento. • Variaciones de la dirección del viento. 	<p>El método de investigación utilizado es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, considerándose los siguientes procedimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Para el sistema original: <p>Diseñar el subsistema eólico, conformado por las etapas: Convertidor DC/DC Buck y Convertidor DC/DC Boost y el convertidor DC/AC (inversor) y simular sus respuestas. Para el bus de continua, la técnica de Control usada es la MPPT, y para el bus de alterna es el SVPWM.</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Para el prototipo (generador solar fotovoltaico a escala reducida) <p>Diseñar e implementar el subsistema solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes de 90 W, en el cual se implementan los algoritmos de Control MPPT y SPWM.</p>
<p>Problema específico N° 1</p> <p>¿Se obtendrá el modelo matemático, el diseño del control MPPT y SVPWM del subsistema eólico de 6 KW y simular su respuesta?</p>	<p>Objetivo específico N° 1</p> <p>Obtener el modelo matemático, diseñar el Control MPPT y SVPWM del subsistema eólico de 6 KW y simular su respuesta.</p>	<p>Hipótesis específica N° 1</p> <p>La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SVPWM al bus de alterna del generador eólico, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC.</p>		
<p>Problema específico N° 2</p> <p>¿Se obtendrá el modelo matemático, el diseño del control MPPT y SVPWM del subsistema solar fotovoltaico de 6 KW y simular su respuesta?</p>	<p>Objetivo específico N° 2</p> <p>Obtener el modelo matemático, diseñar el Control MPPT y SVPWM del subsistema solar fotovoltaico de 6 KW y simular su respuesta.</p>	<p>Hipótesis específica N° 2</p> <p>La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SVPWM al bus de alterna del generador solar fotovoltaico, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC.</p>		
<p>Problema específico N° 3</p> <p>¿Se implementará un generador solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes, de 90 W, en el cual se implementarán los algoritmos de Control MPPT y SPWM usando Arduino como plataforma de desarrollo y mostrar sus resultados?</p>	<p>Objetivo específico N° 3</p> <p>Implementar un generador solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes de 90 W, el cual se implementarán los algoritmos de Control MPPT y SPWM, usando Arduino como plataforma de desarrollo, y mostrar sus resultados.</p>	<p>Hipótesis específica N° 3</p> <p>La aplicación de algoritmos de Control MPPT al bus de continua y Control SPWM al bus de alterna del generador solar fotovoltaico a escala reducida, con orientación automática de dos ejes de 90 W, permitirán mejorar la eficiencia en la generación de energía AC.</p>		

Anexo B: Determinación del factor de potencia de una turbina eólica

```
%Cp.m
%Determinacion del coeficiente de potencia Cp
%Suponemos v1=20m/s y vemos que pasa para distintas velocidades de
V2
V1=20;
V2=1:0.1:20;
Vturbina=(V1+V2)./2;
D=4;
ro=1;
P=ro.*Vturbina*pi*D^2/4*1/2.*(V1^2-V2.^2);
Cpot=P./(1/2*ro*V1^3*pi*D^2/4);
lim(1:191)=max(Cpot);
plot(V2,Cpot,V2,lim,'r')
xlabel('V2 m/s');
ylabel('Cp');
axis([1 20 0 1]);
```

Anexo C: Respuesta V-I y P-V del Panel Solar SFM 90W

```
% RESPUESTA V-I Y P-V DEL PANEL SOLAR SFM 90W
% RespuestaVIPanel.m
clear all;
% DATOS:
Vmpp=18.1; Isc=5.47; Imp=4.98; Voc=21.8;
Rsm=0.74; Rpm=44.49; b=0.0703;

% VOLTAJE Y CORRIENTE OPTIMA GENERADO POR EL PANEL
Vop=Voc+b*Voc*log(b-b*exp(-1/b));
Iop=(Isc-Isc*exp(Vop/(b*Voc)-1/b))/(1-exp(-1/b));

% POTENCIA MÁXIMA GENERADA POR EL PANEL
Pmax=Vop*Iop;

% CORRIENTE Y VOLTAJE GENERADO POR EL PANEL
N=23;
for k=1:N

Vpv=[0;1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20;21;21.8]
;
    I=(Isc-Isc*exp(Vpv/(b*Voc)-1/b))/(1-exp(-1/b));
    V=Vpv;
    %P=(V(k)*Isc-V(k)*Isc*exp(Vpv/(b*Voc)-1/b))/(1-exp(-1/b));
    P(k)=V(k)*I(k);
end
figure;
plot(V,I)
xlabel('V: voltaje (V)');
ylabel('I: corriente (A)');
grid
figure;
plot(V,P)
xlabel('V: voltaje (V)');
ylabel('P: potencia (W)');
grid
```


Anexo D: Respuesta del arreglo de paneles solares

```
% array_panel.m
% PROGRAMA PARA USARLO EN SFUNCTION DE SIMULINK
% ARREGLO DE PANELES SOLARES DE 90 W
%
% SIMULACIÓN CON RADIACIÓN Y TEMPERATURA CONSTANTE
%
s=10; % número paneles en serie
p=5; % número paneles en paralelo
Ein= 1000; % constante de irradiación
Ei= 1000; % irradiación efectiva a la que opera el panel
Tn= 25; % constante de temperatura
T= Tn; % temperatura a la que opera el panel (T=Tn=25°C):
CV= 0.8;
b= 0.0684; % parámetro de ajuste
Isc= 5.47; % corriente de cortocircuito
Voc= 21.80; % voltaje de circuito abierto
Vpmax= 18.10; % voltaje en el punto de máxima potencia
Ipmax= 4.98; % corriente en el punto de máxima potencia
TCv= -0.1261; % coeficiente de voltaje
TCi= 0.00418; % coeficiente de corriente
Vmax= 22.042;
Vmin= 18.190;
Ix= p*(Ei/Ein)*(Isc+(TCi*(T-Tn)));
Vx= (s*(Ei/Ein)*(TCv)*(T-Tn)+(s*Vmax)-((s*(Vmax-
Vmin))*(exp((Ei/Ein)*(log((Vmax-Voc)/(Vmax-Vmin)))))));
Iv= ((Ix/(1-(exp(-1/b))))*(1-(exp((Voc/(b*Vx))-1/b)))));
```

Anexo E: Programa de modelado del convertidor Buck

```
% PROGRAMA DE MODELADO DEL CONVERTIDOR BUCK
% ft buck.m
Vs=218; Vo=180; f=5000; r=0.005; R=10; T=1/f; U=Vo/Vs;
Lmin=(1-U)*R/(2*f); L=1.25*Lmin; IL=Vo/R; delta_IL=(Vs-Vo)*U*T/L;
Imax=IL+delta_IL/2; Imin=IL-delta_IL/2;
ILrms=sqrt(IL^2+(delta_IL/2/sqrt(3))^2); C=(1-U)/(8*L*r*f^2);
Vo=U*Vs;

% FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE LA SALIDA Y EL CICLO DE SERVICIO
%G1=num1/den1
num1=[1/(L*C)]*(Vo/U);
den1=[1 1/(R*C) 1/(L*C)];
figure(1)
step(num1*U,den1)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Voltaje de salida Vo [voltios]')
title('Voltaje de salida del BUCK para un duty cycle U')
grid
%G2=num2/den2
num2=[1/(L*C)]*U;
den2=[1 1/(R*C) 1/(L*C)];
figure(2)
step(num2*Vs,den2)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Voltaje de salida Vo [voltios]')
title('Voltaje de salida del BUCK para una tensión de entrada Vs')
grid
```

Anexo F: Programa de modelado del convertidor Boost

```
% PROGRAMA DE MODELADO DEL CONVERTIDOR BOOST
% ft_boost.m
Vs=180; Vo=240; f=25000; R=25; r=0.01 % rizado
U=1-(Vs/Vo); L=(1-U)^2*U*R/(2*f); C=(U)/(r*R*f); IL=Vs/((1-
U)^2*R);

% FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE LA SALIDA Y EL CICLO DE SERVICIO
%G1=num1/den1
num1=[0 1 -(R*(1-U)^2)/L]*(-Vo/((1-U)*R*C));
den1=[1 1/(R*C) (1-U)^2/(L*C)];
figure(1)
step(num1*U,den1)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Voltaje de salida Vo [voltios]')
title('Voltaje de salida del Boost para un duty cycle U')
grid
%G2=num2/den2
num2=[1/(L*C)]*(1-U);
den2=[1 1/(R*C) (1-U)^2/(L*C)];
figure(2)
step(num2*Vs,den2)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Voltaje de salida Vo [voltios]')
title('Voltaje de salida del Boost para una tensión de entrada
Vs')
grid
```

Anexo G: Programa MPPT para el convertidor Buck

```
% mppt_buck.m
function D = PandO(Vpv, Ipv)
%#codegen
% *****
% MATLAB implementation of a Perturb and Observe algorithm
% for Maximum Power Point Tracking. This algorithm is designed
% to operate with a buck converter
%
% Created by: Carlos Osorio
% *****

% Define internal values for the voltage and power as persistent
% variables
persistent Dprev Pprev Vprev

% Initialize the internal values for the voltage and power on the
% first pass
if isempty(Dprev)
    Dprev = 0.7;
    Vprev = 190;
    Pprev = 2000;
end

% Initialize algorithm parameters
deltaD = 0.0025;

% Calculate measured array power
Ppv = Vpv*Ipv;

% Increase or decrease duty cycle based on conditions
if (Ppv-Pprev) ~= 0
    if (Ppv-Pprev) > 0
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev - deltaD;
        else
            D = Dprev + deltaD;
        end
    else
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev + deltaD;
        else
            D = Dprev - deltaD;
        end
    end
else
    D = Dprev;
end

% Update internal values
Dprev = D;
Vprev = Vpv;
Pprev = Ppv;
```

Anexo H: Programa MPPT para el convertidor Boost

```
% mppt_boost.m
function [Po,Io,comptador_out,temps_ant] =
fcn2(P_abans,I_abans,V_panel,I_panel,P_filtrada,comptador_in,temps
,stepsimulation)
temps_ant=temps+1;
interval=1e-3;
avaluea=temps_ant*stepsimulation;
if (avaluea==interval)
if (I_panel<I_abans && P_filtrada<P_abans) || (I_panel>I_abans &&
P_filtrada>P_abans)
comptador_out=comptador_in-.5;
else
comptador_out=comptador_in+.5;
end
if comptador_out>990 comptador_out=990;
end
if comptador_out<10 comptador_out=10;
end

Po=P_filtrada;
Io=I_panel;
temps_ant=0;
else
Po=P_abans;
Io=I_abans;
comptador_out=comptador_in;
end
```

Anexo I: Programa SVPWM para el inversor trifásico

```

% spwm.m
function vout_a = fcn(saw,t)
Udc=30; %-----tensi_ón de entrada
M =.97; %-----índice de modulaci_ón
f=10; %-----frecuencia de la onda deseada
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[0 0 0]/3;
sector_3=[0 0 0]/3;
uout=(2*M*Udc)/(3.1416); %-Amplitud de la onda deseada
Va=uout*cos(6.283*f*t); %c_álculo de la onda de referencia
Vb=uout*cos(6.283*f*t+2.0944);
Vc=uout*cos(6.283*f*t-2.0944);
Vd=Va; %-----transfromaci_ón a las coordenadas dq(ab)
Vq=0.5774*(-Vb+Vc);
theta=atan2(Vq,Vd); %// c_álculo del valor del _ángulo theta
if(theta<0)
theta=theta+2*pi;
end
%cálculo del sector mediante el uso del _ángulo theta
if(0<=theta && theta<1.0472)
k=1;
elseif(1.0472<=theta && theta<2.0944)
k=2;
elseif(2.0944<=theta && theta<3.1416)
k=3;
elseif(3.1416<=theta && theta<4.1888)
k=4;
elseif(4.1888<=theta && theta<5.2356)
k=5;
elseif(5.2356<=theta && theta<6.2832)
k=6;
else
k=NaN;
end
alfa = theta-(k-1)*pi/3; %c_álculo del a_ángulo alfa
switch (k) %y las secuencias en que se deben encender
case 1 % //los vectores u_l y u_r
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ 2*Udc -Udc -Udc]/3;
sector_3=[ Udc Udc -2*Udc]/3;
case 2
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ -Udc 2*Udc -Udc]/3;
sector_3=[ Udc Udc -2*Udc]/3;
case 3
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ -Udc 2*Udc -Udc]/3;
sector_3=[-2*Udc Udc Udc]/3;
case 4
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ -Udc -Udc 2*Udc]/3;
sector_3=[-2*Udc Udc Udc]/3;
case 5

```

```

sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ -Udc -Udc 2*Udc]/3;
sector_3=[ Udc -2*Udc Udc]/3;
case 6
sector_1=[0 0 0];
sector_2=[ 2*Udc -Udc -Udc]/3;
sector_3=[ Udc -2*Udc Udc]/3;
end
%selececion del modo
%modulacion simple
if(M<=0.5)
%calculo de los tiempos de conmutacion para modulacion simple
tr=0.866/Udc*(sin(k*1.0472)*Vd-cos(k*1.0472)*Vq);
tl=0.866/Udc*(-sin((k-1)*1.0472)*Vd+cos((k-1)*1.0472)*Vq);
t0=(1-2*tr-2*tl)/4;
elseif(0.5<M && M<=0.907)
vout_a=0;
tr=NaN;
%sobremodulacion modo I
elseif(0.907<M && M<0.95)
ar=7713.41914200 + 26764.091172*m^2 - 24882.804398*m -
9598.25432955*m^3;
f1 = Udc/(3^0.5*cos(pi/6-ar));
f2 = Udc/(3^0.5*cos(pi/6-theta+(k-1)*pi/3));
if((theta >= (k-1)*pi/3)&&(theta <= ar+(k-1)*pi/3))
Vd = f1*cos(theta);
Vq = f1*sin(theta);
elseif((theta >= ar+(k-1)*pi/3)&&(theta <= pi/3-ar+(k-1)*pi/3))
Vd = f2*cos(theta);
Vq = f2*sin(theta);
elseif((theta >= pi/3-ar+(k-1)*pi/3)&&(theta <= pi/3+(k-1)*pi/3))
Vd = f1*cos(theta);
Vq = f1*sin(theta);
else
Vd = f1*cos(pi);
Vq = f1*sin(pi);
end
tr=0.866/Udc*(sin(k*1.0472)*Vd-cos(k*1.0472)*Vq);
tl=0.866/Udc*(-sin((k-1)*1.0472)*Vd+cos((k-1)*1.0472)*Vq);
t0=(1-2*tr-2*tl)/4;
%Sobre modulacion modo II
elseif(0.95<=M && M<=1.00)
ah=cos(1.02663902976 + 1.7536342818*acos(m));
ap = (alfa-ah)/(pi/6-ah)*pi/6;
fa = 2*Vdc/3;
fb = Vdc/(3^0.5*cos(pi/6-ap));
if(Theta >= 0+(k-1)*pi/3 && Theta <= ah+(k-1)*pi/3)
vd = fa*cos((k-1)*pi/3);
vq = fa*sin((k-1)*pi/3);
else
if(Theta >= ah+(k-1)*pi/3 && Theta <= pi/3-ah+(k-1)*pi/3)
vd = fb*cos(ap+(k-1)*pi/3);
vq = fb*sin(ap+(k-1)*pi/3);
else
if(Theta >= pi/3-ah+(k-1)*pi/3 && Theta <= pi/3+(k-1)*pi/3)
vd = fa*cos(pi/3+(k-1)*pi/3);

```

```

vq = fa*sin(pi/3+(k-1)*pi/3);
else
vd = -fa;
vq = 0;
end
end
end
tr=0.866/Udc*(sin(k*1.0472)*Vd-cos(k*1.0472)*Vq);
tl=0.866/Udc*(-sin((k-1)*1.0472)*Vd+cos((k-1)*1.0472)*Vq);
t0=(1-2*tr-2*tl)/4;
end
%realizaci_ on del vector mediante los tiempos calculados
if(k==1 | k==3 || k==5)j
if(t0<=saw && saw<=t0+tr)
vout_a=sector_2;
elseif(t0+tr<saw && saw<=t0+tr+tl)
vout_a=sector_3;
else
vout_a=sector_1;
end
else
if(t0<=saw && saw<=t0+tr)
vout_a=sector_3;
elseif(t0+tr<saw && saw<=t0+tr+tl)
vout_a=sector_2;
else
vout_a=sector_1;
end
end
end}

```


Anexo J: Programa SPWM para el inversor monofásico

```

% spwm_ben.m
close all;
clear all;
clf;
Fctrl=60; % Frecuencia de control
ma=0.95; % indice modulacion de amplitud
mf=17.5; % indice modulacion de frecuencia
Vtri=1;
Vctrl=ma*Vtri;
Ftri=mf*Fctrl;
w=2*pi*Fctrl;
T=1/Fctrl;
T2=T/mf; % periodo de triangular
f2=1/T2; % frecuencia de triangular
t=0:T/720:T;
%señal triangular
y=-Vtri*sawtooth(2*pi*(t+T2/4)*f2, .5);
% sin desfase
y2=Vctrl*sin(w*t);
%desfasada 120 grados.
y3=Vctrl*sin(w*t+2*pi/3);
%desfasada 240 grados.
y4=Vctrl*sin(w*t+4*pi/3);
%SPWM PARA SEÑAL SIN DESFASE
for i=1:721
if (y2(i) < y(i))
TAn(i)=0; TAp(i)=1;
SPWM(i)=-1;
else
TAn(i)=1; TAp(i)=0;
SPWM(i)=1;
end
Asen(i)=Vctrl*sind(i/2);
end
x=Vtri*SPWM;
x2=Vtri*SPWM;
Y=x+T*0;
N=length(x);
T=1/N;
% Eje del tiempo, para simular un segundo
t=0:T:1;
% La FFT
mag_y(1:N)=abs(fft(Y(1:N))); % Fourier
% para SPWM senoidal 0 grados
plot (Asen, 'b')
hold on;
plot(x, 'k')
plot (Asen, 'b')
plot((x-x2)/2, 'k')
plot(20*log10(mag_y(1:N/2)/N), 'b') % en dB
% se almacenan las variables en un archivo
TAn = fopen('D:\salida.txt', 'w')
for k=1:0

```

```
fprintf(TAn2, '%f/t%f/t%f/t%f/t%f/n', TAn2(k));  
end  
TAp = fopen('D:\salida.txt', 'w')  
for k=1:0  
fprintf(fid, '%f/t%f/t%f/t%f/t%f/n', TAp2(k));  
end
```

Anexo K: Programa MPPT para el Convertidor DC/DC Buck en Arduino

```
//-----  
// ARDUINO MPPT controlador de carga solar (Version-3)  
//  
//// Specifications:  
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////  
//  
// 1.Solar panel power = 90W  
//  
// 2.Rated Battery Voltage= 18V ( lead acid type )  
// 3.Maximum current = 4.98A //  
// 4.Maximum load current =5.47A  
//  
// 5. voltaje de entrada = voltaje del panel en circuito abierto 18.1 to 21.8V  
//  
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////  
#include "TimerOne.h"  
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  
#include <Wire.h>  
  
//-----  
//////// pines de conexion arduino  
////////////////////////////////////  
// A0 - divisor de voltaje (panel solar)  
// A1 - ACS 712 salida  
// A2 - divisor de voltaje (bateria)  
// A4 - LCD SDA salida para display  
// A5 - LCD SCL salida para display  
// D2 - ESP8266 Tx  
// D3 - ESP8266 Rx through the voltage divider
```

```

// D5 - LCD pulsador de control de retroceso
// D6 - control de carga
// D8 - 2104 MOSFET driver SD
// D9 - 2104 MOSFET driver IN
// D11- LED verde
// D12- LED amarillo
// D13- LED rojo

////////// Definimos
////////////////////////////////////
//

#define SOL_VOLTS_CHAN 0      // definimos el canal adc para leer los datos en volts
del panel solar

#define SOL_AMPS_CHAN 1      // definimos el canal adc para leer los datos de la
corriente del panel solar(amp)

#define BAT_VOLTS_CHAN 2      // definimos el canal adc para leer el voltaje de la
bateria

#define AVG_NUM 8            // Número de iteraciones de la rutina adc para el
promedio de las lecturas adc

// el sensor ACS 712 es usado para medir la corriente. Corriente medida = (5/(1024
*0.185))*ADC - (2.5/0.185)

#define SOL_AMPS_SCALE 0.026393581 // El valor de escala para la lectura adc sin
procesar para obtener la corriente del panel solar // 5/(1024*0.185)

#define SOL_VOLTS_SCALE 0.029296875 // El valor de escala para la lectura adc sin
procesar para obtener los voltios del panel solar // (5/1024)*(R1+R2)/R2 // R1=100k
and R2=20k

#define BAT_VOLTS_SCALE 0.029296875 // El valor de escala para la lectura de adc
sin procesar para obtener los voltios de batería

#define PWM_PIN 9           // pin para salida del pwm (Sólo pin 9 disponible para el
temporizador 1 a 50 kHz)

#define PWM_ENABLE_PIN 8    // Pin utilizado para controlar la función de apagado
del controlador IR2104 MOSFET (Cuando está alto, el conductor mosfet está encendido)

#define PWM_FULL 1023       // El valor real utilizado por las rutinas Timer1 para
100% pwm ciclo de trabajo

#define PWM_MAX 100         // El valor para el ciclo de trabajo pwm 0-100%

#define PWM_MIN 60          // El valor para el ciclo de trabajo pwm 0-100% (por
debajo de este valor la corriente que se ejecuta en el sistema es = 0)

```

```

#define PWM_START 90          // El valor para el ciclo de trabajo pwm 0-100%
#define PWM_INC 1            //El valor incremental al valor pwm para el algoritmo ppt

#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define ON TRUE
#define OFF FALSE

#define TURN_ON_MOSFETS digitalWrite(PWM_ENABLE_PIN, HIGH) // Habilitar
controlador MOSFET
#define TURN_OFF_MOSFETS digitalWrite(PWM_ENABLE_PIN, LOW) // desabilitar
controlador MOSFET

#define ONE_SECOND 50000    //Cuenta para el número de interrupción en 1
segundo en el período de interrupción de 20us

#define LOW_SOL_WATTS 90.00  //Valor de los vatios solares // esto es 90 watts
#define MIN_SOL_WATTS 1.00   //Valor de los vatios solares // esto es 1.00 watts
#define MIN_BAT_VOLTS 11.00  //Valor del voltaje de la bateria
#define MAX_BAT_VOLTS 14.10  //Valor del voltaje de la bateria
#define BATT_FLOAT 13.60     // voltaje de la bateria cuando paramos de cargar
#define HIGH_BAT_VOLTS 13.00 //valor del voltaje de la bateria
#define LVD 11.5             //Configuración de desconexión de baja tensión para un
sistema de 12V
#define OFF_NUM 9           //Número de iteraciones del estado del cargador

//-----
//Definilos los pines de los leds del indicador
#define LED_RED 11
#define LED_GREEN 12
#define LED_YELLOW 13
//-----
// Definición del pin de control de carga
#define LOAD_PIN 6 // pin-6

```

```

//-----
// definicion de la luz posterior del lcd
#define BACK_LIGHT_PIN 5 // pin-5
//-----
//////////////////////////////////////BIT MAP
ARRAY//////////////////////////////////////
//-----

byte solar[8] = //icono panel solar
{
  0b11111,
  0b10101,
  0b11111,
  0b10101,
  0b11111,
  0b10101,
  0b11111,
  0b00000
};

byte battery[8] = // icono para la bateria
{
  0b01110,
  0b11011,
  0b10001,
  0b10001,
  0b11111,
  0b11111,
  0b11111,
  0b11111,
};

byte _PWM [8] = // icono para el pwm

```

```

{
  0b11101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10101,
  0b10111,
};
//-----

// variables globales
float sol_amps;          // solar amps
float sol_volts;        // solar volts
float bat_volts;        // bateria volts
float sol_watts;        // watts solar
float old_sol_watts = 0; //
unsigned int seconds = 0; //
unsigned int prev_seconds = 0; //
unsigned int interrupt_counter = 0; //
unsigned long time = 0; //
int delta = PWM_INC; //
int pwm = 0; // pwm duty ciclo 0-100%
int back_light_pin_State = 0; //
int load_status = 0; //

enum charger_mode {off, on, bulk, bat_float} charger_state; //
//          addr, en,rw,rs,d4,d5,d6,d7,bl,blpol
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); //

```

```

void setup()
{
  lcd.init();
  pinMode(LED_RED, OUTPUT);
  pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);
  pinMode(LED_YELLOW, OUTPUT);
  pinMode(PWM_ENABLE_PIN, OUTPUT);
  Timer1.initialize(20);
  Timer1.pwm(PWM_PIN, 0);
  TURN_ON_MOSFETS;
  Timer1.attachInterrupt(callback);
  Serial.begin(9600);
  pwm = PWM_START;
  charger_state = on;
  pinMode(BACK_LIGHT_PIN, INPUT);
  pinMode(LOAD_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(LOAD_PIN, HIGH);
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.noBacklight();
  lcd.createChar(1, solar);
  lcd.createChar(2, battery);
  lcd.createChar(3, _PWM);
}

//-----
// Main loop
//-----

void loop()
{
  read_data();           //
  run_charger();        //
  print_data();         //
}

```



```

load_control();          //
led_output();           //
lcd_display();          //

}

int read_adc(int channel) {
    int sum = 0;
    int temp;
    int i;

    for (i = 0; i < AVG_NUM; i++) {
        temp = analogRead(channel);
        sum += temp;
        delayMicroseconds(50);
    }
    return (sum / AVG_NUM);
}

void read_data(void) {
    sol_amps = (read_adc(SOL_AMPS_CHAN) * SOL_AMPS_SCALE - 12.01);
    sol_volts = read_adc(SOL_VOLTS_CHAN) * SOL_VOLTS_SCALE;
    bat_volts = read_adc(BAT_VOLTS_CHAN) * BAT_VOLTS_SCALE;
    sol_watts = sol_amps * sol_volts ;           //calculo de la potencia
}

void callback()
{
    if (interrupt_counter++ > ONE_SECOND) {
        interrupt_counter = 0;
        seconds++;
    }
}

```

```
}
```

```
void set_pwm_duty(void) {
```

```
    if (pwm > PWM_MAX) {
```

```
        pwm = PWM_MAX;
```

```
    }
```

```
    else if (pwm < PWM_MIN) {
```

```
        pwm = PWM_MIN;
```

```
    }
```

```
    if (pwm < PWM_MAX) {
```

```
        Timer1.pwm(PWM_PIN, (PWM_FULL * (long)pwm / 100), 20);
```

```
        //Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL * (long)pwm / 100));
```

```
    }
```

```
    else if (pwm == PWM_MAX) {
```

```
        Timer1.pwm(PWM_PIN, (PWM_FULL - 1), 20);
```

```
        //Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL - 1));
```

```
    }
```

```
}
```

```
void run_charger(void) {
```

```
    static int off_count = OFF_NUM;
```

```
    switch (charger_state) {
```

```
        case on:
```

```
            if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
```

```
                charger_state = off;
```

```
                off_count = OFF_NUM;
```

```
                TURN_OFF_MOSFETS;
```

```
            }
```

```
            else if (bat_volts > (BATT_FLOAT - 0.1)) {
```

```
                charger_state = bat_float;
```

```
            }
```

```

else if (sol_watts < LOW_SOL_WATTS) {
    pwm = PWM_MAX;
    set_pwm_duty();
}
else {
    pwm = ((bat_volts * 10) / (sol_volts / 10)) + 5;
    charger_state = bulk;
}
break;
case bulk:
    if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
        charger_state = off;
        off_count = OFF_NUM;
        TURN_OFF_MOSFETS;
    }
    else if (bat_volts > BATT_FLOAT) {
        charger_state = bat_float;
    }
    else if (sol_watts < LOW_SOL_WATTS) {
        charger_state = on;
        TURN_ON_MOSFETS;
    }
    else {
        if (old_sol_watts >= sol_watts) {
            delta = -delta;
        }
        pwm += delta;
        old_sol_watts = sol_watts;
        set_pwm_duty();
    }
    break;
case bat_float:

```

```

if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
    charger_state = off;
    off_count = OFF_NUM;
    TURN_OFF_MOSFETS;
    set_pwm_duty();
}
else if (bat_volts > BATT_FLOAT) {
    TURN_OFF_MOSFETS;
    pwm = PWM_MAX;
    set_pwm_duty();
}
else if (bat_volts < BATT_FLOAT) {
    pwm = PWM_MAX;
    set_pwm_duty();
    TURN_ON_MOSFETS;
    if (bat_volts < (BATT_FLOAT - 0.1)) {
        charger_state = bulk;
    }
}
break;
case off:
    TURN_OFF_MOSFETS;
    if (off_count > 0) {
        off_count--;
    }
    else if ((bat_volts > BATT_FLOAT) && (sol_volts > bat_volts)) {
        charger_state = bat_float;
    }
    else if ((bat_volts > MIN_BAT_VOLTS) && (bat_volts < BATT_FLOAT) && (sol_volts >
bat_volts)) {
        charger_state = bulk;
    }

```

```

    }
    break;
default:
    TURN_OFF_MOSFETS;
    break;
}
}

//-----
--

////////////////////////////////////control de la carga
////////////////////////////////////

//-----
--

void load_control() {
    if ((sol_watts < MIN_SOL_WATTS) && (bat_volts > LVD)) {
        digitalWrite(LOAD_PIN, LOW);
        load_status = 1;
    }
    else {
        digitalWrite(LOAD_PIN, HIGH);
        load_status = 0;
    }
}

void print_data(void) {

    Serial.print(seconds, DEC);
    Serial.print(" ");
    Serial.print("Charging = ");
    if (charger_state == on) Serial.print("on ");
    else if (charger_state == off) Serial.print("off ");
}

```

```

else if (charger_state == bulk) Serial.print("bulk ");
else if (charger_state == bat_float) Serial.print("float");
Serial.print("  ");

Serial.print("pwm = ");
Serial.print(pwm, DEC);
Serial.print("  ");

Serial.print("Current (panel) = ");
Serial.print(sol_amps);
Serial.print("  ");

Serial.print("Voltage (panel) = ");
Serial.print(sol_volts);
Serial.print("  ");

Serial.print("Power (panel) = ");
Serial.print(sol_volts);
Serial.print("  ");

Serial.print("Battery Voltage = ");
Serial.print(bat_volts);
Serial.print("  ");

Serial.print("\n\r");
//delay(1000);
}

//-----
//-----Led indicadores-----
//-----

```

```

void led_output(void)
{
  if (bat_volts > 14.1 )
  {
    leds_off_all();
    digitalWrite(LED_RED, HIGH);
  }
  else if (bat_volts > 11.9 && bat_volts < 14.1)
  {
    leds_off_all();
    digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
  }
  else if (bat_volts < 11.8)
  {
    leds_off_all;
    digitalWrite(LED_GREEN, HIGH);
  }
}

//-----
//
// This function is used to turn all the leds off
//
//-----

void leds_off_all(void)
{
  digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
  digitalWrite(LED_RED, LOW);
  digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
}

```

```

//-----
//----- LCD DISPLAY -----
//-----

void lcd_display()
{
  back_light_pin_State = digitalRead(BACK_LIGHT_PIN);
  if (back_light_pin_State == HIGH)
  {
    time = millis();
  }

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("SOL");
  lcd.setCursor(4, 0);
  lcd.write(1);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(sol_volts);
  lcd.print("V");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print(sol_amps);
  lcd.print("A");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print(sol_watts);
  lcd.print("W ");
  lcd.setCursor(8, 0);
  lcd.print("BAT");
  lcd.setCursor(12, 0);
  lcd.write(2);
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print(bat_volts);
  lcd.setCursor(8, 2);

```



```

if (charger_state == on)
{
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(8, 2);
  lcd.print("on");
}
else if (charger_state == off)
{
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(8, 2);
  lcd.print("off");
}
else if (charger_state == bulk)
{
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(8, 2);
  lcd.print("bulk");
}
else if (charger_state == bat_float)
{
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(8, 2);
  lcd.print("float");
}

//-----
//-----estado de carga de la bateria-----
//-----

lcd.setCursor(8, 3);
if ( bat_volts >= 12.7)
  lcd.print( "100%");
else if (bat_volts >= 12.5 && bat_volts < 12.7)

```

```

    lcd.print( "90%");
else if (bat_volts >= 12.42 && bat_volts < 12.5)
    lcd.print( "80%");
else if (bat_volts >= 12.32 && bat_volts < 12.42)
    lcd.print( "70%");
else if (bat_volts >= 12.2 && bat_volts < 12.32)
    lcd.print( "60%");
else if (bat_volts >= 12.06 && bat_volts < 12.2)
    lcd.print( "50%");
else if (bat_volts >= 11.90 && bat_volts < 12.06)
    lcd.print( "40%");
else if (bat_volts >= 11.75 && bat_volts < 11.90)
    lcd.print( "30%");
else if (bat_volts >= 11.58 && bat_volts < 11.75)
    lcd.print( "20%");
else if (bat_volts >= 11.31 && bat_volts < 11.58)
    lcd.print( "10%");
else if (bat_volts < 11.3)
    lcd.print( "0%");

//-----
//-----Duty Cycle-----
//-----

lcd.setCursor(15, 0);
lcd.print("PWM");
lcd.setCursor(19, 0);
lcd.write(3);
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(pwm);
lcd.print("%");

```

```

//-----
//-----estado de carga-----
//-----
lcd.setCursor(15, 2);
lcd.print("Load");
lcd.setCursor(15, 3);
if (load_status == 1)
{
  lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(15, 3);
  lcd.print("On");
}
else
{
  lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(15, 3);
  lcd.print("Off");
}
backLight_timer();
}

void backLight_timer() {
  if ((millis() - time) <= 15000)
    lcd.backlight();
  else
    lcd.noBacklight();
}

```

Anexo L: Programa de Control PID para el Convertidor DC/DC Boost en Arduino

```
int TiempoMuestreo=1;
unsigned long pasado=0;
unsigned long ahora;
double Error;
double Error1;
double U;
double U1;
double ErrorPas=0;
double ErrorAnt=0;
//
int Valorsensor=0;
int ValorRefer=0;
float Voltsensor=0.0;
float VoltRefer=0.0;
int PWM=0;
int Derecha=9;//5
int Izquierda=10;//6
//////////sensor de volatje //////////

int val=0;
float voltaje=0;
float volt=0;
float R1=6100000;
float R2=100000;
////////////////////////////////////

int kp=10;
//int ki=5;
int ki=6.4168;
//int kd=1;
int kd=0.1319;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  ValorRefer = 35;
  //////////// codigo sensor ////////////
  for(int i=1;i<1000;i++){
    val=analogRead(A0);
    delayMicroseconds(1);

    volt=(float)val*5.0/1024.0+volt;
  }
  Valorsensor=(float) volt/1000.0*(R1+R2)/R2;
  volt=0.0;
  //////////////////////////////////////

  //ValorRefer = analogRead(A1);
```

```

//Voltsensor = Valorsensor*5.0/1023;
//VoltRefer = ValorRefer*5.0/1023;
analogWrite (Derecha, 0); //pwm
analogWrite (Izquierda, 0); //pwm
//Control proporcional en lazo cerrado
ahora=millis();
int CambioTiempo=ahora-pasado;
if(CambioTiempo >= TiempoMuestreo)
{
    Error = ValorRefer - Valorsensor;

    ErrorPas=Error*TiempoMuestreo+ErrorPas;
    double ErrorD=(Error-ErrorAnt)/TiempoMuestreo;
    float P=kp*Error;
    float I=ki*ErrorPas;
    float D=kd*ErrorD;
    U=P+I+D;
    pasado = ahora;
}
Serial.print ("voltaje sensor: ");
Serial.print (Valorsensor);
Serial.print (" | voltaje Referencia: ");
Serial.print (ValorRefer); // chequear posición esta el
potenciómetro del motor.
Serial.print(" | Error= " );
Serial.print(Error);
delay(1); //para que se pueda leer datos impresos. de lo
contrario pasan demasiado rapido
U1 = abs(U);
Error1=abs(Error);
//
if(U > 255) { //si PWM total es mayor a 255
    PWM = 255; //limitamos U
}
if(U < -255) {
    PWM = 255;
}
//en este caso si el valor siguiente es menor al del
potenciómetro, , seria atraso del motor.
if (Error >= 0.05) {
    PWM =80 + U1;
    analogWrite (Derecha, 0); //pwm
    analogWrite (Izquierda, PWM); //pwm
    delay(1);
}
//En este caso si el valor siguiente es mayor al del
potenciómetro,
if (Error <= -0.05) {
    PWM =80 + U1;
    analogWrite(Derecha, PWM); //pwm
    analogWrite (Izquierda, 0); //pwm
    delay(1);
}
if (Error1 < 0.05){
    PWM = 0;
    analogWrite(Derecha, PWM); //pwm
}

```

```
    analogWrite (Izquierda, PWM); //pwm
    delay(1);
}
Serial.print (" PWM: ");
Serial.println (PWM);
delay(100);
```

Anexo M: Consentimiento informado

Yó, **NICANOR RAÚL BENITES SARAIVIA**, doy fe que mi tesis titulada **“CONTROL DE POTENCIA MPPT Y SVPWM, APLICADO A UN SISTEMA EÓLICO-SOLAR AUTÓNOMO”**, es de mi autoría, y su aplicación en sistemas de gran potencia puede ser significativa y de vital importancia para resolver los problemas energéticos de nuestro País, a nivel de generación y de preservación de condiciones apropiadas del medio ambiente.

Finalmente, faculto a que la información contenida en mi tesis pueda ser utilizada por otro investigador, haciendo la respectiva referencia.

Dando fe de lo declarado, firmo



NICANOR RAÚL BENITES SARAIVIA

Callao, agosto del 2017.