

▯ SISTEMA INVERSOR HÍBRIDO - MANUAL TÉCNICO COMPLETO

Parte 3: Cálculos y Ecuaciones

9. DIMENSIONAMIENTO SOLAR

9.1 Conceptos Básicos

Horas Sol Pico (HSP):

HSP = Irradiancia diaria total (kWh/m²/día)

Ejemplo:

Bahía Blanca: 4.3 kWh/m²/día promedio anual

→ HSP = 4.3 horas

Eficiencia del Sistema:

$\eta_{\text{sistema}} = \eta_{\text{panel}} \times \eta_{\text{inversor}} \times \eta_{\text{cables}} \times \eta_{\text{controlador}}$

Típico:

$\eta_{\text{panel}} = 0.17$ (17%)

$\eta_{\text{inversor}} = 0.95$ (95%)

$\eta_{\text{cables}} = 0.98$ (98%)

$\eta_{\text{controlador}} = 0.97$ (97%)

$\eta_{\text{sistema}} = 0.17 \times 0.95 \times 0.98 \times 0.97 = 0.154$ (15.4%)

Simplificado: $\eta_{\text{sistema}} = 0.85$ (85%)

9.2 Ecuaciones de Dimensionamiento

Opción 1: Desde Consumo → Sistema Necesario

Paso 1: Energía Solar Necesaria

$E_{\text{solar}} = \text{Consumo}_{\text{diario}} \times \% \text{cobertura}_{\text{solar}}$

Ejemplo:

Consumo = 15.6 kWh/día

Cobertura solar = 60% (resto eólico)

$E_{\text{solar}} = 15.6 \times 0.60 = 9.36$ kWh/día

Paso 2: Potencia Pico Necesaria

$$P_{\text{pico}} = E_{\text{solar}} / (HSP \times \eta_{\text{sistema}})$$

Ejemplo:

$$P_{\text{pico}} = 9.36 / (4.3 \times 0.85)$$

$$P_{\text{pico}} = 9.36 / 3.655$$

$$P_{\text{pico}} = 2,562 \text{ W} = 2.56 \text{ kW}$$

Paso 3: Número de Paneles

$$N_{\text{paneles}} = \text{ceil}(P_{\text{pico}} / P_{\text{panel}})$$

Ejemplo con panel 400W:

$$N_{\text{paneles}} = \text{ceil}(2562 / 400)$$

$$N_{\text{paneles}} = 7 \text{ paneles}$$

Paso 4: Potencia Total Real

$$P_{\text{total}} = N_{\text{paneles}} \times P_{\text{panel}}$$

Ejemplo:

$$P_{\text{total}} = 7 \times 400\text{W} = 2,800\text{W}$$

Paso 5: Generación Diaria Estimada

$$E_{\text{diaria}} = (P_{\text{total}} / 1000) \times HSP \times \eta_{\text{sistema}}$$

Ejemplo:

$$E_{\text{diaria}} = (2800 / 1000) \times 4.3 \times 0.85$$

$$E_{\text{diaria}} = 2.8 \times 4.3 \times 0.85$$

$$E_{\text{diaria}} = 10.2 \text{ kWh/día}$$

Paso 6: Área Total Necesaria

$$\text{Área}_{\text{total}} = N_{\text{paneles}} \times \text{Área}_{\text{panel}}$$

Ejemplo con paneles de 1.65 m²:

$$\text{Área}_{\text{total}} = 7 \times 1.65 = 11.55 \text{ m}^2$$

9.3 Ángulo e Inclinación

Ángulo Óptimo:

$$\alpha_{\text{óptimo}} = |\text{Latitud}| \pm 15^\circ$$

Para Bahía Blanca (Lat: -38.72°):

$$\alpha_{\text{óptimo}} = 38.7^\circ \pm 15^\circ$$

$$\text{Verano: } 38.7^\circ - 15^\circ = 23.7^\circ$$

$$\text{Invierno: } 38.7^\circ + 15^\circ = 53.7^\circ$$

$$\text{Fijo anual: } 38.7^\circ$$

Orientación:

Hemisferio Sur: Orientación al NORTE
Hemisferio Norte: Orientación al SUR

Desviación máxima aceptable: $\pm 20^\circ$
Pérdida por 10° de desviación: $\sim 1.5\%$

9.4 Factores de Corrección

Por Temperatura:

$$P_{\text{real}} = P_{\text{nominal}} \times [1 - 0.005 \times (T_{\text{panel}} - 25)]$$

Ejemplo:

Panel 400W a 45°C en verano:

$$P_{\text{real}} = 400 \times [1 - 0.005 \times (45 - 25)]$$
$$P_{\text{real}} = 400 \times [1 - 0.005 \times 20]$$
$$P_{\text{real}} = 400 \times 0.90 = 360\text{W} \text{ (10\% pérdida)}$$

Por Suciedad:

$$\text{Factor}_{\text{suciedad}} = 0.95 \text{ (5\% pérdida)}$$

Con limpieza semestral: 0.95

Con limpieza mensual: 0.98

Sin limpieza: 0.85-0.90

Por Sombreado:

$$\text{Factor}_{\text{sombra}} = (100 - \% \text{sombreado}) / 100$$

10% sombreado \rightarrow Factor = 0.90

20% sombreado \rightarrow Factor = 0.80

☐ Sombra en serie reduce TODO el string

10. DIMENSIONAMIENTO EÓLICO

10.1 Ecuaciones Fundamentales

Potencia del Viento Disponible:

$$P_{\text{viento}} = 0.5 \times \rho \times A \times v^3$$

Donde:

ρ = densidad aire (kg/m^3)

A = área barrido (m^2)

v = velocidad viento (m/s)

Densidad aire al nivel del mar: 1.225 kg/m^3

Área de Barrido:

$$A = \pi \times r^2$$

Donde:

r = radio de las palas (m)

D = diámetro = $2r$

Ejemplo turbina 1.8m diámetro:

$$A = \pi \times (0.9)^2 = 2.54 \text{ m}^2$$

Límite de Betz:

$$P_{\text{max_teórica}} = P_{\text{viento}} \times 0.593$$

El límite de Betz establece que MÁXIMO se puede extraer el 59.3% de la energía del viento.

Esto es una ley física fundamental.

Potencia Real Aprovechable:

$$P_{\text{real}} = P_{\text{viento}} \times \eta_{\text{turbina}}$$

η_{turbina} típica: 0.30 - 0.40 (30-40%)

η_{turbina} buena: 0.35 - 0.45 (35-45%)

η_{turbina} excelente: 0.40 - 0.50 (40-50%)

Promedio usado: $\eta = 0.35$ (35%)

10.2 Ejemplo de Cálculo Completo

Datos:

- Turbina 2000W
- Diámetro: 2.5m
- Viento promedio: 5.2 m/s

Paso 1: Área de Barrido

$$r = D / 2 = 2.5 / 2 = 1.25\text{m}$$

$$A = \pi \times (1.25)^2 = 4.91 \text{ m}^2$$

Paso 2: Potencia del Viento

$$P_{\text{viento}} = 0.5 \times 1.225 \times 4.91 \times (5.2)^3$$

$$P_{\text{viento}} = 0.5 \times 1.225 \times 4.91 \times 140.61$$

$$P_{\text{viento}} = 422 \text{ W}$$

Paso 3: Límite de Betz

$$P_{\text{max_teórica}} = 422 \times 0.593 = 250 \text{ W}$$

Paso 4: Potencia Real (35% eficiencia)

$$P_{\text{real}} = 422 \times 0.35 = 148 \text{ W}$$

Paso 5: Generación Diaria

$$\begin{aligned} E_{\text{diaria}} &= (P_{\text{real}} \times 24) / 1000 \\ E_{\text{diaria}} &= (148 \times 24) / 1000 \\ E_{\text{diaria}} &= 3.55 \text{ kWh/día} \end{aligned}$$

10.3 Velocidad de Viento y Altura

Perfil de Viento (Ley Potencial):

$$v_h = v_{h_0} \times (h / h_0)^\alpha$$

Donde:

α = coeficiente (típico 0.14 - 0.20)

h_0 = altura de medición

h = altura del rotor

v_{h_0} = velocidad a h_0

v_h = velocidad a h

Ejemplo:

Viento a 10m: 4.5 m/s

Altura turbina: 15m

$\alpha = 0.14$

$$v_h = 4.5 \times (15/10)^{0.14}$$

$$v_h = 4.5 \times 1.057$$

$$v_h = 4.76 \text{ m/s}$$

10.4 Curva de Potencia

Velocidades Características:

$v_{\text{cut-in}}$: Velocidad de arranque (3-4 m/s)

v_{nominal} : Velocidad nominal (12-14 m/s)

$v_{\text{cut-out}}$: Velocidad de corte (25-30 m/s)

Ejemplo turbina típica:

$v_{\text{cut-in}} = 3.5 \text{ m/s}$

$v_{\text{nominal}} = 12 \text{ m/s}$

$v_{\text{cut-out}} = 25 \text{ m/s}$

Distribución de Weibull:

$$P(v) = (k/c) \times (v/c)^{(k-1)} \times e^{-(v/c)^k}$$

Donde:

k = factor de forma (1.5 - 3.0)

c = factor de escala (relacionado con v_media)

v = velocidad del viento

Para estimación rápida:

$$c \approx 1.13 \times v_{media}$$

11. DIMENSIONAMIENTO DE BATERÍA

11.1 Ecuaciones Básicas

Capacidad Necesaria:

$$C_{batería} = (\text{Consumo}_{diario} \times \text{Días}_{autonomía}) / \text{DoD}$$

Donde:

DoD = Profundidad de Descarga (Depth of Discharge)

Para LiFeP04: DoD = 0.80 (80%)

Para Plomo-ácido: DoD = 0.50 (50%)

Ejemplo Completo:

Consumo: 15.6 kWh/día

Autonomía: 2 días

Batería: LiFeP04 (DoD = 80%)

$$C_{batería} = (15.6 \times 2) / 0.80$$

$$C_{batería} = 31.2 / 0.80$$

$$C_{batería} = 39 \text{ kWh}$$

11.2 Conversión a Ah

Capacidad en Amperios-Hora:

$$C_{Ah} = (C_{kWh} \times 1000) / V_{sistema}$$

Ejemplo sistema 48V:

$$C_{Ah} = (39 \times 1000) / 48$$

$$C_{Ah} = 812.5 \text{ Ah}$$

11.3 Configuración Serie/Paralelo

Baterías en Serie (Voltaje):

$N_{\text{serie}} = V_{\text{sistema}} / V_{\text{batería}}$

Ejemplo:

Sistema 48V con baterías 12V:

$N_{\text{serie}} = 48 / 12 = 4$ baterías en serie

Baterías en Paralelo (Capacidad):

$N_{\text{paralelo}} = C_{\text{Ah}_\text{necesaria}} / C_{\text{Ah}_\text{batería}}$

Ejemplo:

Necesaria: 812.5 Ah

Batería: 200 Ah cada una

$N_{\text{paralelo}} = 812.5 / 200 = 4.06$

$N_{\text{paralelo}} = 5$ (redondear arriba)

Configuración Total:

$\text{Total_baterías} = N_{\text{serie}} \times N_{\text{paralelo}}$

Ejemplo:

Total = $4 \times 5 = 20$ baterías

Configuración: 4S5P (4 serie, 5 paralelo)

Voltaje final: 48V

Capacidad final: 1000 Ah

Energía total: $48V \times 1000Ah = 48 \text{ kWh}$

11.4 Ciclos de Vida vs DoD

Relación DoD - Ciclos:

LiFePO4:

DoD 80%: ~5,000 ciclos

DoD 50%: ~8,000 ciclos

DoD 30%: ~12,000 ciclos

Plomo-ácido:

DoD 50%: ~1,200 ciclos

DoD 30%: ~2,500 ciclos

DoD 20%: ~4,000 ciclos

Años de Vida Estimados:

$\text{Años} = (\text{Ciclos} \times \text{DoD}) / (\text{Consumo_diario} / C_{\text{batería}} \times 365)$

Ejemplo:

Batería LiFePO4 48kWh, DoD 80%:

Consumo: 15.6 kWh/día

Ciclos: 5,000

$\text{Años} = (5000 \times 0.80) / (15.6 / 48 \times 365)$

$\text{Años} = 4000 / (0.325 \times 365)$

$\text{Años} = 4000 / 118.6$

$\text{Años} \approx 34 \text{ años}$

(En práctica: 10-15 años por degradación química)

12. CARGAS INDUCTIVAS

12.1 Clasificación de Cargas

Cargas Resistivas (FP \approx 1.0):

Potencia Activa (W) = Potencia Aparente (VA)

Ejemplos:

- Luces incandescentes
- Calefactores
- Hornos eléctricos
- Pavas eléctricas

Factor de potencia: 0.95 - 1.00

Factor de arranque: 1.0 - 1.2x

Cargas Inductivas (FP < 1.0):

Potencia Activa (W) < Potencia Aparente (VA)

Ejemplos:

- Heladeras
- Aires acondicionados
- Lavarropas
- Bombas de agua
- Motores

Factor de potencia: 0.60 - 0.85

Factor de arranque: 3.0 - 7.0x

12.2 Factor de Potencia

Definición:

$$FP = P_{\text{activa}} / P_{\text{aparente}} = \cos(\varphi)$$

Donde:

P_{activa} (W): Potencia útil

P_{aparente} (VA): Potencia total

φ : Ángulo de desfase

Cálculo de Corriente:

Para cargas resistivas:

$$I = P / V$$

Para cargas inductivas:

$$I = S / V = P / (V \times FP)$$

Ejemplo:

Heladera 400W, FP = 0.70, 220V

$$I = 400 / (220 \times 0.70)$$

$$I = 400 / 154$$

$$I = 2.60 \text{ A}$$

Pero la potencia aparente es:

$$S = 400 / 0.70 = 571 \text{ VA}$$

12.3 Pico de Arranque

Factor de Arranque:

$$P_{\text{pico}} = P_{\text{nominal}} \times \text{Factor}_{\text{arranque}}$$

Heladera 400W:

Factor = 4.0

$$P_{\text{pico}} = 400 \times 4.0 = 1,600\text{W}$$

Duración: 1-3 segundos

Tabla de Factores Típicos:

Electrodoméstico	Factor	Duración
Luces LED	1.0x	0s
Luces incandescentes	1.2x	0.1s
TV LCD	1.5x	0.5s
Heladera	4.0x	2s
Freezer	4.0x	2s
Lavarropas	5.0x	3s
Aire acondicionado	3.5x	2.5s
Bomba agua	4.5x	2s
Soldadora	3.0x	1s
Taladro	3.0x	1s

12.4 Dimensionamiento Inversor

Regla Práctica:

$P_{\text{inversor continuo}} \geq P_{\text{cargas resistivas}} + P_{\text{cargas inductivas}}$

$P_{\text{inversor pico}} \geq \max(P_{\text{picos individuales}}) \times 1.2$

Margen de seguridad: 20%

Ejemplo Real:

Cargas:

- Luces: 300W (resistiva)
- Heladera: 400W (inductiva, pico 1,600W)
- Lavarropas: 500W (inductiva, pico 2,500W)
- TV: 150W (resistiva)

Consumo nominal total: 1,350W

Pico máximo (si arrancan juntos):

$300 + 1,600 + 2,500 + 150 = 4,550\text{W}$

Inversor necesario:

Continuo: $1,350\text{W} \times 1.3 = 1,755\text{W} \rightarrow 2,000\text{W}$

Pico: $4,550\text{W} \times 1.2 = 5,460\text{W} \rightarrow 6,000\text{W}$

Inversor recomendado: 2,000W continuo / 6,000W pico

Estrategia de Arranque Secuencial:

Para evitar inversor muy grande:

1. Arrancar heladera (pico 1,600W)
2. Esperar 5 segundos
3. Arrancar lavarropas (pico 2,500W)

Pico máximo real: 2,500W (no simultáneo)

Inversor necesario:

Continuo: $1,755\text{W} \rightarrow 2,000\text{W}$

Pico: $2,500\text{W} \times 1.2 = 3,000\text{W}$

Inversor recomendado: 2,000W / 3,000W
(Más económico)

FIN PARTE 3

Continúa en *MANUAL_COMPLETO_PARTE_4.md*