

Bibliografía

- [Barra 84] Barra L., Catalanotti S., Fontana F. and lavorante F.(1984). *An analytical method to determine the optimal size of photovoltaic plant.* Solar Energy 33. 509-514.
- [Beyer 93] Beyer H.G. Gabler H. and Nottebaum K. (1993). *Solar/Wind-Hybrid systems for autonomous supply of small electrical loads..* In Proc. ISES Solar World Congr. Vol8. Budapest- Hungría.
- [Bucciarelli 86] Bucciarelli L.L. (1986).*The effect of day to day correlation in solar radiation on the probability of loss-of-power in a stand-alone-photovoltaic energy system.* Solar Energy. 36, 11-14.
- [Egido 92] Egido M.A. y Lorenzo E. (1992). *The sizing of stand-alone photovoltaic systems: a review and a proposed new method.* Solar Energy Mater. Solar Cells. 26, 51-69.
- [EHAS 98] Escudero A. Martinez A. y Villaroel V. (1998) *Enlace Hispanoamericano de Salud. Tecnologías de comunicación de bajo costo para el campo sanitario* <http://viracocha.teb.upm.es> GBT. ETSITM.
- [Fokuoka 78] Masanobu Fokuoka.(1978) *The one straw revolution. An Introduction to natural farming.* Rodale Press.
- [Gordon 87] Gordon. J.M. (1987). *Optimal sizing of stand-alone photovoltaic solar power systems.* Solar Cells 20. 295-313
- [Gordon 98] Gordon J.M., Reddy T.A. (1988).*Time series analysis of daily horizontal solar radiation.* Solar Energy. 41 215-216.
- [Hass 94] Hass A. (1994) *Soeicher in Photovoltaiksystemen-Ableitung von Auskegungskriterien aus standortspezifischen Metereologieparametern.* Tagungsbericht Neuntes Internationalen Sonnenforum. Stuttgart. Germany pp 834-841

- [Hollands 98] Graham V.A. Hollands K.G.T. and Unny T.E. (1988) *A time series model for K_t with application to global synthetic weather generation*. Solar Energy 41. 215-216
- [IER 90] Avia F, Arias F. (1990) *Principios de Conversión de Energía Eólica*. Serie Ponencias IER-CIEMAT. Vol I-II
- [Klein 87] Klein S.A. and Beckmann W.A. (1987). *Loss of load probabilities for stand-alone photovoltaics systems..* Solar Energy.39 pp 499-512.
- [Langer 95] Hans Georg Beyer and Christian Langer (1996). *A method for the identification of configurations on pv/wind hybrid systems for the reliable supply of small loads*. Solar Energy Vol 57. Num. 5 pp381-391
- [MEN 90] D.G. de innovación Industrial y Tecnológica, Centro de estudios de la Energía, ASINEL y I.N.M.(1990) *Mapa Eólico Nacional*. I.N.M. España
- [MEE 90] Olmos V., Escudero J.M, Ayuste R. Fresneda A.(1990) *Manual de Energía Eólica*. IDAE. Ministerio de Industria
- [Mollison 78] Bill Mollison.(1978) *Permacultura I*. Editorial Tagari. Australia.
- [Mollison 94] Bill Mollison. Reny Mia Stay (1994) *Introducción a la Permacultura*. Editorial Tagari. Australia.
- [Nottebaum 94] Nottebaum K. (1994) *Kombinierte Nutzung von Sonne und Wind zur autonomen Energieversorgung kleiner elektrischer Verbraucher-Auslegung fur Standorte in Europa*. Diploma. Thesis. Dept. Physics. Universidad de Oldenburg. Alemania.
- [Urquia 83] Urquia L. y Urquia J.L. (1983) *Energía hidráulica y eólica práctica*. Hermanos Urquia Lus PAMIELA. Pamplona
- [Valverde 92] Valverde F.J. (1992) *Cálculo de series sintéticas de radiación solar global diaria mediante matrices de Markov* PFC. IES.ETSITM. España

Sistema mixto eólico fotovoltaico en vivienda
rural basada en el concepto de
"Permacultura"

Alberto Escudero Pascual aep@nodo50.org

16 de Mayo 1998

Índice General

I	Introducción y Objetivos	13
1	Introducción al PFC	14
1.1	La realidad energética...	14
1.2	Objetivos del Proyecto	15
1.2.1	Objetivos del proyecto y su desarrollo	16
1.3	Breve introducción al concepto de Permacultura	17
II	Métodos para la estimación del potencial energético.	19
2	Propuesta para el cálculo del potencial energético de un SHEFV	20
2.1	Introducción a los SHEFV	20
2.2	Descripción general del método de dimensionamiento de SHEFV Langer-Beyer	20
3	Métodos de dimensionamiento para SMFV.	24
3.1	Método del IES para la parametrización de la LLP	24
3.1.1	Método numérico para el cálculo de la LLP	26
3.1.2	Método analítico para el cálculo de la LLP	28
3.1.3	Obtención de las líneas isofiables para una determinada LLP	29
3.2	Método de Barra-Klein para la parametrización de la eficiencia de SMFV	30
3.2.1	Correlación del Método de Barra	31
3.2.2	Comentarios al método propuesto por Barra-Klein	31
4	Métodos de dimensionamiento para SME	33
4.1	Método de la LLP para SME. Primeras aproximaciones	33
4.1.1	Cuantificación del potencial eólico	33

4.1.2	Parámetros representativos del potencial eólico	35
4.2	Método para el cálculo de los parámetros de Weibull	38
4.2.1	Variaciones temporales del viento	39
4.2.2	Caracterización de tamaño del generador eólico.	40
4.2.3	Notas al método de cálculo de la LLP para el SME	41
4.3	Métodos para la estimación de la energía producida por un aerogenerador de baja velocidad	41
4.4	Módulo estático de estimación de energía producida por un SME	43
4.4.1	Obtención de las curvas de duración	43
4.4.2	Curvas de potencia. Producción de electricidad mediante sistemas eólicos	46
4.4.3	Obtención de la potencia eléctrica disponible. Modelo Estático.	49
4.4.4	Inconvenientes del modelo estático frente al LLP para SME	53
4.4.5	Generalización del modelo estático para aerogeneradores de una misma serie	53
5	Método de dimensionamiento Langer-Beyer para SHEFV	57
5.1	Consideraciones previas	57
5.2	Datos de entrada del método-Series sintéticas	58
5.3	Simulación temporal y variación de las configuraciones	59
5.4	Resumen del método Langer-Beyer para SHEFV	63
5.4.1	Parámetros necesarios para el método de LLP para SHEFV	63
5.4.2	Cálculo de la potencia normalizada para los SMFV y SME	63
5.4.3	Cálculo de los parámetros intermedios	64
5.4.4	Cálculo de la relación final	65
6	Método propuesto para dimensionar SHEFV	66
6.1	Inconvenientes del método Langer-Beyer	66
6.1.1	Aspectos relacionados con el método de Barra	66
6.1.2	Aspectos relacionados con la normalización de la turbina	66
6.1.3	Aspectos relacionados con la interpretación del tamaño del aerogenerador	67
6.2	Método propuesto de estudio	68
6.2.1	Datos meteorológicos de entrada al sistema	69
6.2.2	Preparación de los datos de irradiación para la simulación	69
6.2.3	Preparación de los datos de velocidad de viento para la simulación	70

6.3	Método de simulación	70
6.3.1	Resumen y pasos del método	73
III Métodos para la estimación de la demanda energética		75
7	Electrificación doméstica	76
7.1	Introducción	76
7.2	Evaluación del consumo de energía eléctrica	77
7.2.1	Evaluación del consumo mensual de CC	77
7.2.2	Evaluación del consumo mensual de CA	77
7.3	Energía eléctrica para equipos de comunicación por radio . . .	78
8	Potencia eléctrica para bombeo de agua	79
8.1	Introducción a las bombas	79
8.2	Bombas de agua	80
8.3	Diseño del sistema	81
8.3.1	Caudal requerido de agua	81
8.3.2	Altura Total	82
8.3.3	Altura Total Equivalente	83
8.3.4	Caudal máximo de extracción	84
8.3.5	Pérdidas de altura en función del flujo de extracción para distintos diámetros de tubería.	84
8.3.6	Cálculo del caudal medio	86
IV Aplicación práctica en una vivienda de clima continental		87
9	Cálculo de la oferta energética del SFV	88
9.1	Cálculo de los valores de irradiación media diaria mensual . .	89
9.1.1	Tratamiento de los datos y validación de los 12 valores mensuales	89
9.2	Generación de series sintéticas de radiación a partir de matri- ces de Markov	94
9.2.1	Comprobación de la validez de la serie generada	94
9.2.2	Resultado de la simulación	96
9.2.3	Inconvenientes del método. Trampa Estadística	97

10 Cálculo de la oferta energética del SME	99
10.1 Fuente de datos del potencial eólico.	99
10.2 Aerogeneradores comerciales de baja potencia	102
10.2.1 Turbina INCLIN 250 W	103
10.2.2 Turbina J.BORNAY G-250 W	104
10.2.3 Turbina 300 FP 7 G	106
10.3 Resultados del método para G-250W	108
10.4 Resultados del método para INCLIN -250W	110
10.5 G-250W Versus INCLIN	112
10.5.1 Generalización del modelo estático para aerogeneradores de la serie INCLIN	113
11 Cálculo de la demanda de energía eléctrica de la vivienda	115
11.1 Energía para iluminación	115
11.2 Energía para el bombeo	116
11.3 Energía para el sistema de comunicaciones	117
11.4 Consumo mensual total en Ah	118
12 Resumen de resultados y dimensionado final	119
12.1 Resultados del SMFV	119
12.2 Resultados del SME	119
12.3 Resultado final de la demanda energética	121
12.4 Oferta/Demanda respecto a sus valores medios	121
12.5 Dimesionado final	123
12.6 Esquema de la instalación del SHEFV	125
V Conclusiones	128
13 Conclusiones	129
13.1 Aspectos relacionados con la energía eólica y los aerogeneradores	129
13.1.1 Escalabilidad de aeroturbinas	129
13.1.2 Curva de potencia de aeroturbinas	129
13.1.3 Modelo de simulación Langer-Beyer.	130
13.1.4 Generación de series de series de viento	130
13.2 Aspectos relacionados con la energía solar fotovoltaica	131
13.2.1 Método de Barra utilizado por Langer-Beyer	131
13.2.2 Generación de series diarias a partir de pocos datos históricos	131
13.3 Aspectos relacionados con la “Permacultura”	131
13.4 Aspectos relacionados con el dimensionado final	132

A Estructuras y sistemas en “Permacultura”	133
A.1 La integración de la casa y el huerto	133
A.2 La casa en los climas templados	135
A.2.1 Proporciones y ubicación de las ventanas	136
A.2.2 Aislamiento	137
A.2.3 Materiales naturales de aislamiento	139
A.2.4 Plantando alrededor de la casa	140
A.2.5 El invernadero adjunto a la casa de sombra	141
A.3 Modificación de la casa	142
A.4 La casa en los climas tropicales	144
A.5 La casa de los climas secos	146
A.6 Casas subterráneas	150
A.7 Casas construidas con plantas	151
A.7.1 Techos de césped	152
A.8 Recursos procedentes de los desechos de la casa	153
A.9 Estrategias tecnológicas en “Permacultura”	155

Índice de Figuras

3.1	Relación entre Cs-Ca. $f=0.7$ $u=0.2$	29
3.2	Correlacion en el metodo de Barra	32
4.1	$f(v)$ de Weibull $a=1$ $C=2.3$	36
4.2	$F(v)$ de Weibull $a=1$ $C=2.3$	37
4.3	Espectro de la velocidad del viento	40
4.4	Distintos tipos de aerogeneradores	47
4.5	Curva de potencia del G-250W	50
4.6	$P(V>V_x)$ [h]	51
4.7	$T(\text{horas})$ [v]	52
4.8	Potencia [h]	53
5.1	Curva normalizada del aerogenerador según Nottebaum	58
5.2	Potencia Normalizada	64
8.1	Perfiles de difusión del agua alrededor del pozo	82
8.2	Altura equivalente de fricción por cada 100 metros de tubería	85
9.1	Comparativa entre las tres fuentes de datos	94
9.2	Relación entre los datos de entrada y los de salida de la generación	95
9.3	Cs-Cs para distintas LLP	97
10.1	Curva de potencia para G250W e Inclín	106
10.2	Potencia [h] para G250W	109
10.3	Energía mensual producida por G250W e Inclín	113
11.1	Caudal de bombeo en l/h Shurflo 9600 100W para 12 Vcc y $H_{te}=10m$	117
11.2	Consumos totales en CC	118
12.1	Energía de la G250W vs Irradiación en el plano del array (60)	121

12.2	Valor relativo de la oferta y la demanda respecto a su valor medio	122
12.3	Esquema de la instalación del SHEFV	127
A.1	Diseño de la casa de sombra anexa a la ventana de la cocina .	134
A.2	“El cuarto de lodo” como un área de preparación y almacenamiento una la casa y el jardín	136
A.3	Las casas de clima templado contemplan la posibilidad de ubicar los cuartos en el lado de sombra y las áreas de trabajo en el lado de soleado.	137
A.4	Los aleros y ventanas de la casa se ubican de manera tal que el sol invernal entre a la casa pero no el veraniego.	138
A.5	El invernadero en el lado soleado de la casa ayuda en la calefacción especialmente en los climas fríos.	142
A.6	El aire frío circula desde la casa de sombra hasta la casa atraído por el invernadero.	143
A.7	Ubicación de casas en los subtropicales (A) donde la orientación es hacia el sol debido a los inviernos fríos y en los trópicos (B) donde la casa se orienta hacia las brisas frescas y esta rodeada de sombra.	144
A.8	Los techos con rejillas de ventilación permiten que el aire caliente del cuarto escape y los enrejados permiten que el aire frío entre en la vivienda	145
A.9	La casa de clima seco seco tiene las paredes gruesas , jardines interiores y enrejados encima de las edificaciones.	147
A.10	El túnel de tierra provee de aire fresco húmedo a las casas de los desiertos. La pendiente del túnel baja hacia la casa, es sombreada en su apertura al exterior, tiene una cama húmeda compuesta de ceniza gruesa (B) y una vasija con agua en la salida del aire.	148
A.11	“Instalaciones” en el techo en los climas secos-calientes. Muchas funciones del patio se dan en el techo.	149
A.12	Maneras de redirigir el agua a los sanitarios	150
A.13	Las casas en terraplenes en los climas áridos mantienen la casa aislada y fresca. Los bejucos pueden dar sombra a las paredes que miran al sol.	151
A.14	Construcción de techos de césped.	152
A.15	Disposición del contenido de un tanque séptico a través de una línea de llantas	154
A.16	Cocina solar	156

Índice de Tablas

4.1	Valores del Mapa Eólico Nacional para Valladolid. Nudos . . .	44
4.2	Valores del Mapa Eólico Nacional para Valladolid. m/seg . . .	45
6.1	Coefficiente “n” en función del tipo de rugosidad	70
6.2	Tabla que resume los resultados de la simulación	74
7.1	Consumos en CC y uso más frecuente	77
8.1	Tipos de bombas	79
8.2	Altura manométrica por cada 100 metros de tubería de hierro recta	86
8.3	Coefficientes de corrección para distintos materiales	86
9.1	Irradiación media. Valores CENSOLAR (Valladolid)	90
9.2	Irradiación media. Valores INM (Valladolid)	91
9.3	Irradiación media. Valores IDAE. (Valladolid)	93
9.4	Tabla comparativa de las tres fuentes de datos	93
9.5	Comparación de los valores medios de irradiación de la serie generado respecto a los datos medios de entrada	95
9.6	Resultados finales de la simulación	96
10.1	Datos de viento para Valladolid	100
10.2	Valores de Weibull de las diferentes estaciones	101
10.3	Descripción general de los modelos de aerogeneradores	103
10.4	INCLIN 250W	104
10.5	G-250W	105
10.6	300 FP7G	106
10.7	G-250W	108
10.8	Energía del G-250W producida en cada estación	109
10.9	Energía del G-250W producida en cada mes	110
10.10	INCLIN-250W	111
10.11	Energía del INCLIN-250W producida en cada estación	111
10.12	Energía del INCLIN-250W producida en cada mes	112

10.13	Horas equivalentes a potencia nominal para distintos aerogeneradores	114
11.1	Consumos en CC	115
11.2	Características de la bomba Shurflo 9300	116
11.3	Consumos para el nodo de comunicaciones.	117
11.4	Resultado final del consumo en CC de la vivienda	118
12.1	Resultados finales de la simulación LLP. (IES)	119
12.2	Horas mensuales equivalentes a potencia nominal para el G250-W	120
12.3	Energía del G-250W producida en cada mes	120
12.4	Valor relativo de la oferta y la demanda respecto a sus valores medios	122
12.5	Descripción general del aerogenerador G-250W	126

$a^{-1/C}$	Factor de escala.
AF	Fctor de operación.
$\langle A \rangle^{-1/C}$	Factor de escala.
$\langle AA \rangle$	Factor de escala
A	Sección transversal de área A perpendicular a la corriente de aire.
A_G	Área del generador.
$B_0 = 1.367W/m^2$	Unidad astronómica
$B_d(\beta, \alpha)$	Fracción directa de radiación sobre el plano del array
$B_d(0)$	Fracción directa de radiación sobre el plano horizontal
b	Número de palas
c	Valor inverso de un generador fotovoltaico. C_{Avx} .
C	Factor de forma
$\langle C \rangle$	Factor de forma
C_B	Capacidad nominal de la batería.
C_U	Capacidad utilizable del acumulador.
C_{AVo}	Potencia fotovoltaica media normalizada para sist. monovalentes.
C_{AWo}	Potencia eólica media normalizada para sistemas monovalentes.
C_{Aw_1}	Tamaño del generador eólico con una producción igual al consumo de la carga durante el mes de peor irradiación.
C_L	Coefficiente de sustentación aerodinámica
C_D	Coefficiente de resistencia aerodinámica
$\frac{C_L}{C_D}$	Fineza del perfil.
C_p	Coefficiente de potencia de una máquina.
C_q	Par de arranque.
c	Cuerda de un perfil.
D	Diametro del aerogenerador.
D	Fuerza de resistencia aerodinámica.
$D_d(\beta, \alpha)$	Fracción difusa de radiación sobre el plano del array
$D_d(0)$	Fracción difusa de radiación sobre el plano horizontal
E	Energía de origen eólico.
E_{ELw}	Energía eléctrica disponible en bornas del rectificador.
e	Energía de origen eólico por unidad de volumen.
E_{aux_j}	Energía aportada por el sistema auxiliar el día "j".
E_{def_j}	Energía deficitaria del SHEFV para el día "j".
$F(v)$	Distribución de frecuencias acumuladas de Weibull.
F_C	Factor de corrección.
$f_o(v)$	Función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento.
$f_o(v)_T$	Función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento durante un periodo T
FPE	Factor de potencia eólico.
$G_{ce}(0)$	Nivel de irradiación estándar de $1000 W/m^2$.

$G_d(\alpha, \beta)$	Valor medio de la irradiación diaria sobre el plano del generador.
G_{dm}	Valor medio mensual de la irradiación diaria sobre el plano del generador.
$G_{dm(min)}(\alpha, \beta)$	Irradiación media mensual mínima sobre el plano del array.
G_x	Valor medio de irradiación solar de los meses con menor velocidad de viento $\frac{W}{m^2}$
G_s	Nivel de irradiación estándar de $1000 W/m^2$.
$g250w.dat$	Serie experimental de valores (v, P) para el aerogenerador G250W.
$g250wt.dat$	Valores (t, P) para el aerogenerador G250W para distribución de vientos $f_o(v)$
$g250wn.dat$	Serie experimental de valores normalizados (v, P) para el aerogenerador G250W respecto a la P_{NOM}
H_T	Altura total de extracción
H_{ST}	Nivel estático.
H_{DT}	Nivel Dinámico.
H_{CI}	Altura del depósito.
H_F	Altura de fricción.
K_t	Índice de claridad medio para el mes con el menor nivel de irradiación.
K_D	Fracción difusa.
L	Valor medio de la energía diaria consumida por la carga.
L	Fuerza de sustentación aerodinámica.
l	Longitud característica en rotores.
LLP	Probabilidad de pérdida de carga.
LLP_V	Probabilidad de pérdida de carga en SMFV
LLP_W	Probabilidad de pérdida de carga en SME.
n	R.P.M. Régimen de trabajo de la máquina.
PD_{mx}	Profundidad de descarga máxima de la batería.
$\langle P \rangle_A$	Potencia media aprovechable.
P_d	Energía que fluye por unidad de volumen, o potencia disponible.
P_a	Energía aprovechable.
P_{aEL}	Potencia eléctrica aprovechable.
P_{em}	Perdidas electromecánicas del generador eléctrico.
$P(v \geq V_x)$	Probabilidad de que la velocidad de viento sea mayor que V_x .
$P_w(v)$	Potencia normaliza de la turbina.
P_{W_n}	Curva de potencia del aerogenerador “n” de la serie.
P_{NOM_n}	Potencia nominal del aerogenerador “n” de la serie.
P_{NORM}	Curva de potencia normalizada de la serie respecto a P_{NOM_n} .
Q_D	Caudal que se quiere extraer
Q_T	Caudal de prueba de bombeo.
Q_{AP}	Caudal medio de extracción.
$Q_{AP_{mensual}}$	Caudal medio de extracción mensual.
Q_{MAX}	Caudal máximo de extracción.

Re	Número de Reynolds
r	Coefficiente de autocorrelación de las series de datos.
$r(1)$	Coefficiente de autocorrelación de primer orden [días]
$SHEFV$	Sistemas híbridos eólicos fotovoltaicos.
$SMFV$	Sistemas monovalentes fotovoltaicos.
SME	Sistemas monovalentes eólicos.
SOC	State of charge.
$\frac{t}{c}$	Espesor relativo del perfil.
t	Espesor máximo
V_{AC}	Tensión en corriente alterna.
V_{CC}	Tensión nominal de la instalación.
$\langle V \rangle$	Velocidad media
\bar{v}	Velocidad media mensual (m/s)
$\overline{v_{min}}$	Velocidad media mínima mensual (m/s)
$x_1(C), x_2(C)$	Parámetros intermedios para el cálculo de la función de Weibull.
η_G	Eficiencia de conversión del generador.
ρ	Densidad del aire $1,225 \frac{Kg}{m^3}$
$\Gamma(x)$	Función Gamma.
λ	Coefficiente adimensional que caracteriza a los aerogeneradores. Relación de velocidades.
λ_{opt}	Valor λ óptimo o de diseño.
ν	Ángulo de paso
θ	Ángulo de torsión
μ	Viscosidad del aire.
ω	Velocidad de rotación.
$\phi_{f_{T,serie}}$	Resultado de evaluar $\int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}$
η_{70}	Rendimiento del inversor al 70 de la carga.

Parte I

Introducción y Objetivos

Capítulo 1

Introducción al PFC

1.1 La realidad energética...

No es necesario un análisis muy riguroso de la realidad de nuestro planeta para darse cuenta que los niveles de consumo que actualmente se mantienen en los países denominados desarrollados nos llevan a grandes contradicciones. Con el ánimo de crecer económicamente nos lanzamos a sistemas productivos que inciden sobre nuestro planeta y por ende sobre los seres humanos que lo habitan. El uso irracional de la energía es otra forma de consumo desmedido que nos lleva a la "sobreexplotación" de los recursos que nos ofrece el nuestro planeta.

Este tipo de reconversión energética hacia energías más limpias aunque supone un desembolso inicial que no todas las economías pueden asimilar, supone un importante paso para poder romper la dependencia económica de los proveedores de combustible y apostar por un desarrollo sostenible planetario (sin entrar en si realmente existe voluntad política de hacerlo ó si los promotores de la trasferencia tecnológica serán las mismas empresas multinacionales que controlan el oligopolio del petróleo)

El uso de la energía renovables posibilita la creación de nuevas alternativas de vida, que apuestan por un mayor respeto al medio ambiente y que se orientan hacia la autosuficiencia.

Las energías renovables son un gran instrumento para cambiar el futuro de nuestro planeta pero esta revolución tecnológica será inútil si no hacemos un análisis mucho más crítico de la realidad económica y política que nos ha llevado a no saber coexistir en armonía con todos los seres vivos de la Tierra.

1.2 Objetivos del Proyecto

El proyecto tiene un claro carácter multidisciplinar y pretende ofrecer un método de aprovechamiento de los recursos que la naturaleza nos brinda sin por ello tener que causar daños irreversibles que pusieran en peligro la sostenibilidad del entorno.

Podemos hacer las cosas nosotros mismos o pagar a otras personas para que nos las hagan. Son dos sistemas de abastecimiento que podríamos denominar "sistema de autarquía" y "sistema de organización", respectivamente. El primero tiende a crear hombres y mujeres independientes; el segundo supone hombres y mujeres integrados en una organización. Todas las comunidades existentes se basan en una mezcla de ambos sistemas; pero la proporción de uno a otro es diversa.

Dr. E.F. Schumacher

El proyecto pretende recoger algunos de los conocimientos necesarios para lanzarse a la utilización de una alternativa que potencie mucho más la autarquía que la organización.

No se trata sólo de tener conocimientos de agricultura ecológica, arquitectura bioclimática, tratamiento de residuos y energías renovables sino de hacer un uso correcto de esos conocimientos que derive en una utilización eficaz y sostenible de los recursos. Para ello se hace necesario profundizar sobre el papel que juega cada elemento en el sistema sostenible y cómo incide en los otros elementos del sistema. No sólo consiste, por tanto, en aglutinar conocimientos aislados sino de integrarlos para dar lugar a algo absolutamente diferente.

Esta relación de las partes con el todo se hace evidente cuando se quiere dimensionar una instalación de energía mixta eólico-fotovoltaica. Podríamos invertir mucho tiempo en evaluar la radiación solar disponible (oferta) y no conseguir por ello una instalación adecuada; es indispensable profundizar en las necesidades energéticas de los usuarios para poder conocer la energía demandada. Por otro lado, un incorrecto dimensionamiento de la instalación provocará una variación de los hábitos de los usuarios (por defecto de oferta) o un sobredimensionamiento de la instalación con el consecuente despilfarro

de recursos (por exceso de oferta).

1.2.1 Objetivos del proyecto y su desarrollo

El proyecto se centra en el dimensionamiento de un sistema mixto eólico-fotovoltaico *SHEFV*¹ para una vivienda rural en la localidad de Piña de Esgueva (Valladolid) en la que se han introducido aspectos relacionados con la "permacultura" que inciden directamente en la estimación de la demanda energética que se desea cubrir.

La estructura que se ha decidido dar al proyecto fin de carrera es como sigue:

Parte I Introducción y Objetivos del Proyecto Fin de Carrera.

Parte II En la segunda parte se describen los métodos para la estimación de la oferta y demanda energética. Se estudian los métodos de dimensionamiento de sistemas híbridos y monovalentes así como los mecanismos para determinar la demanda energética que debe ser cubierta por energías renovables. En esta parte se describe el método de dimensionamiento de Langer-Beyer [Langer 95] y sus inconvenientes. Este apartado concluye con una propuesta de método de dimensionamiento para *SMEFV*.

Parte III En la tercera parte se estudia la demanda energética de una vivienda rural que necesita electrificación para iluminación, pequeños electrodomésticos, un nodo de comunicaciones por Radio Paquete y un subsistema de bombeo para el riego.

Parte IV La cuarta parte se centra en una aplicación práctica de los métodos de dimensionamiento que se han ilustrado en los apartados anteriores. Se estudia el potencial energético y las necesidades de electricidad para una vivienda situada en Piña de Esgueva (Valladolid) y se ofrece un dimensionado para la misma.

Parte V El proyecto concluye con el apartado de conclusiones.

Apéndice "Estructura y sistemas en Permacultura"

¹A partir de ahora usaremos *SHEFV* por sistema híbrido eólico-fotovoltaico

El proyecto, por tanto, profundiza en las aplicaciones de energías renovables en sistemas autónomos como las viviendas rurales sin conexión a red. Antes de realizar un dimensionamiento del sistema se ha hecho necesario hacer un estudio de las posibles soluciones energéticas que se pueden implementar en la vivienda y que pueden afectar al futuro tamaño del sistema. Para ilustrar estos aspectos se ha incluido a modo de apéndice un capítulo sobre “Estructuras y sistemas en Permacultura” donde se tratan temas relacionados con ahorro energético, arquitectura bioclimática, energía solar térmica, agricultura biológica. . .

1.3 Breve introducción al concepto de Permacultura

Durante los años 70 en la Universidad de Tasmania Bill Mollison y David Holmgren desarrollan una estructura para un sistema de agricultura sostenible basada en policultivos de árboles perennes, arbustos, hierbas (legumbres y malas hierbas), hongos y tubérculos. Este sistema es acuñado como “permacultura” y da lugar a la publicación *Permaculture I* (1978)[Mollison 78].

Aunque en sus inicios la permacultura era concebida como la asociación beneficiosa de plantas y animales en relación con los asentamientos humanos, apuntando hacia el abastecimiento de la casa y la comunidad, la permacultura es, en la actualidad, más que autosuficiencia para la alimentación en la casa. La autosuficiencia no tiene razón de ser si la gente no tiene acceso a la tierra, a la información y a los recursos económicos. De ésta forma, en los años recientes, la permacultura se ha orientado hacia estrategias legales y financieras apropiadas, incluyendo estrategias para el acceso a la tierra, estructuras de microempresas y autofinanciamiento regional.

Permacultura es un sistema de diseño para la creación de medioambientes humanos sostenibles. La palabra en sí misma es una asociación de agricultura y cultura permanente. La permacultura trata con animales, plantas, construcciones e infraestructuras (agua, energía y comunicaciones), pero la permacultura no trata de estos elementos en sí mismos, sino sobre las relaciones que podemos crear entre ellos y por la forma en que los ubicamos en el paisaje.

El objetivo es crear sistemas que sean ecológicamente sostenibles y eco-

nómicamente viables, que cubran las propias necesidades, no exploten o contaminen y que sean sostenibles a largo plazo. La permacultura utiliza las cualidades inherentes de las plantas y los animales combinadas con las características naturales del paisaje así como las estructuras para producir un sistema que soporte la vida para la ciudad y el campo utilizando la menor área práctica posible.

La permacultura esta basada en la observación de los sistemas naturales, la sabiduría contenida en los sistemas tradicionales de las granjas y el conocimiento científico moderno y la tecnología.

Fokuoka en su libro *“The One Straw Revolution”*[Fokuoka 78] ilustra esta concepción de los sistemas:

“Esta es la filosofía de trabajar con la naturaleza, más que contra ella; es la filosofía de la observación constante y meditativa más que la del trabajo constante; es la observación de plantas y animales en todas sus funciones más que del tratamiento de elementos como si fueran un producto aislado del sistema. Yo he hablado en un nivel más mundano de realizar aikido en la tierra, de rodar con los golpes, convirtiendo la adversidad en fortaleza y usar todo de manera positiva. La otra visión se refiere a hacer karate en la tierra para tratar de hacerla rendir por el uso de nuestra fortaleza y darle muchos golpes duros. Pero atacar a la naturaleza es atacarnos a nosotros mismos.”

M. Fokuoka. 1978

Parte II

Métodos para la estimación del potencial energético.

Capítulo 2

Propuesta para el cálculo del potencial energético de un SHEFV

2.1 Introducción a los SHEFV

Los sistemas autónomos basados en generadores fotovoltaicos y eólicos con almacenamiento por medio de baterías son una opción para la alimentación de pequeñas cargas en emplazamientos remotos. Para dimensionar un sistema híbrido es necesario identificar todas las combinaciones posibles que ofrecen un determinado nivel de satisfacción o fiabilidad.

De todas estas opciones la óptima se obtiene al valorar el coste económico de cada una de las posibilidades para un mismo nivel de fiabilidad.

El objetivo ideal sería obtener un conjunto de ecuaciones que ligen los datos meteorológicos (radiación solar y velocidad de viento) de un emplazamiento con el tamaño de cada uno de los elementos del sistema. (Generador eólico, fotovoltaico y baterías).

2.2 Descripción general del método de dimensionamiento de SHEFV Langer-Beyer

La configuración idónea para un determinado emplazamiento depende de las condiciones climáticas. El carácter complementario que presentan la energía

eólica y solar en muchas regiones durante los ciclos estacionales presenta algunas importantes ventajas[Langer 95]. En estos casos los sistemas híbridos ganan fiabilidad respecto a los sistemas con una sola fuente de energía (monovalentes) sin necesidad de un sobredimensionamiento de los convertidores o las baterías.

Para decidir que configuración utilizaremos en primer lugar identificaremos todos los posibles dimensionados que satisfagan un determinado nivel de fiabilidad para más tarde incorporar otros parámetros para seleccionar el diseño definitivo. Entre los parámetros que se incorporan en esta última selección esta el económico aunque no es el único; otros factores como el mantenimiento o la previsión de repuestos deben ser tenidos en cuenta en la decisión final.

En próximos capítulos se describe como obtener el conjunto de combinaciones de generador FV, generador eólico y batería que satisfacen un determinado nivel de fiabilidad.

Uno de los métodos usados en la actualidad se basa en la simulación temporal del sistema para una determinada configuración. La configuración se va variando hasta satisfacer los niveles de fiabilidad que se exigen al sistema.

Hasta el momento sólo se han desarrollado métodos de este estilo para sistemas monovalentes. Estos métodos permiten una identificación rápida de las posibles configuraciones con un nivel de probabilidad del 99% partiendo de un conjunto de parámetros meteorológicos.

Las ventajas de combinar el uso del viento y el sol para la generación de energía eléctrica ha sido ya estudiada y entre sus ventajas ofrece la reducción del coste total de la instalación. El mayor o menor beneficio de esta opción depende de la anticorrelación estacional en el tiempo de ambas recursos (el sol y el viento).

Se puede aumentar la fiabilidad de los sistemas teniendo en cuenta que ambas fuentes de energía pueden estar en correlación inversa.¹.

Las influencias básicas de las características estadísticas de los datos de irradiación en la fiabilidad del sistema han sido analizadas por ejemplo por Klein y Beckmann [Klein 87]. Usaron series generadas (de síntesis) con ca-

¹Se debe entender por correlación -1

racterísticas bien definidas para investigar la influencia de la función de distribución mensual (que se supone que esta solamente determinada por el valor del índice de claridad) y del coeficiente de autocorrelación de las series diarias sobre la *LLP*. Estas simulaciones daban como resultado que pequeñas desviaciones estándar y pequeños coeficientes de autocorrelación de los valores diarios implicaban un beneficio sobre la fiabilidad del sistema. Se llegaron a los mismos resultados utilizando modelos de cadenas de Markov [Bucciarelli 86] y [Gordon 87].

Ségún Beyer las gráficas de la fiabilidad de sistemas FV pueden ser representadas por funciones analíticas que involucran algunos parámetros meteorológicos básicos. Estos pueden incluir los valores medios mensuales, parámetros que caracterizan la función de distribución y las características de la autocorrelación de las series diarias. Otros autores afirman que los errores cometidos por este método obligan a no poder utilizar expresiones analíticas de este tipo para cualquier emplazamiento y es necesario obtener expresiones de la *LLP* más particularizadas [Egido 92]

Se ha hecho un intento de extender este método a los sistemas SHEFV. En este método hemos restringido el análisis a sistemas con pequeñas *LLP* (1%). Esta restricción mantiene el concepto de considerar principalmente las condiciones meteorológicas para los peores meses. Según Beyer esta afirmación se justifica si se asume que los sistemas con alto nivel de fiabilidad sólo dejan de funcionar durante los meses de baja velocidad de viento o baja radiación solar.

La raíz del método se basa en la simulación temporal para evaluar la eficacia del sistema. Como datos de entrada son necesarios series horarias de datos meteorológicos. La ausencia de datos suficientes de origen histórico nos obligará en la mayoría de los casos a generar series sintéticas.

Una vez fijado el nivel de fiabilidad que le exigimos al sistema y partiendo de unas condiciones iniciales, se evalúa la eficiencia del sistema durante un periodo adecuado (generalmente varios años). Las condiciones iniciales son el tamaño de ambos generadores y la batería. El valor de cada una de las condiciones iniciales se va variando hasta que se llega al nivel de fiabilidad prefijado. El método iterativo suele fijar dos de los tres elementos para variar el tamaño del tercero. Usando una matriz de búsqueda dentro de un margen razonable de valores se pueden obtener un número de configuraciones factibles.

Antes de pasar a una descripción del modelo de dimensionado propuesto por Christian Langer y Hans Georg Beyer² para SHEFV se describirán los métodos de dimensionado utilizados en sistemas monovalentes, base teórica de los modelos de simulación para sistemas híbridos.

²H.G. Beyer es miembro del Centro de Energía de la Escuela de Minas de Paris y C. Langer del Departamento de Física de la Universidad de Oldenburg en Alemania

Capítulo 3

Métodos de dimensionamiento para SMFV.

3.1 Método del IES para la parametrización de la LLP

El IES¹ ha desarrollado un método basado en el evaluar La fiabilidad de un sistema autónomo mediante el concepto de Probabilidad de Pérdida de Carga, generalmente denominada *LLP* (*Loss of Load Probability*). La *LLP* mide la relación entre el déficit y la demanda energética. Ambos términos son considerados en la carga y durante todo el tiempo de la instalación.

Debido a la naturaleza aleatoria de la radiación solar el valor adoptado por *LLP* nunca será 0.

A la hora de dimensionar el sistema fotovoltaico debemos enfrentarnos con la cuantificación del generador y del acumulador. Más adelante veremos que relacionar estas dimensiones con la carga y con el periodo de un día facilitará enormemente nuestro empeño. La capacidad del generador, C_A , se define como la relación entre los valores medios de la energía producida por el generador y la energía consumida por la carga. La capacidad del acumulador, C_S , se define como la máxima energía que puede extraerse de él dividida por el valor medio de la energía consumida por la carga. Es decir:

$$C_A = \frac{\eta_G G_d(\alpha, \beta) A_G}{L} \quad (3.1)$$

¹Instituto de Energía Solar. UPM. Madrid

$$C_S = \frac{C_U}{L} \quad (3.2)$$

$$C_U = \frac{C_B}{PD_{max}} \quad (3.3)$$

donde:

A_G Es el área del generador.

η_G Es la eficiencia de conversión del generador.

$G_d(\alpha, \beta)$ Es el valor medio de la irradiación diaria sobre el plano del generador.

L Es el valor medio de la energía diaria consumida por la carga.

C_U Es la capacidad utilizable del acumulador.

C_B Es la capacidad nominal de la batería.

PD_{max} Es la profundidad de descarga máxima de la batería.

G_{dm} Es el valor medio mensual de la irradiación diaria sobre el plano del generador.

Es posible encontrar diferentes pares de valores de C_A y C_S que nos ofrezcan un mismo LLP

En instalaciones domésticas un valor de LLP de 10^{-2} para iluminación y 10^{-1} para electrodomésticos resultan satisfactorios.

Definimos C'_A en función de el valor medio mensual de irradiación diaria sobre plano horizontal, definir así C'_A nos permite trabajar con valores de $G_d(\alpha, \beta)$ con α y β nulos, ya que en general los datos de irradiación media mensual están disponibles para superficies horizontales.

$$C'_A = \frac{\eta_G A_G G_{dm}(0)}{L} = C_A \frac{G_{dm}(0)}{G_{dm}(\alpha, \beta)} \quad m = 1, 2, \dots, 12 \quad (3.4)$$

Conocido C'_A podemos obtener el producto de $\eta_G A_G$ y calcular el número de módulos a utilizar de un modelo comercial elegido previamente. Si utilizamos en lugar de C'_A el valor de C_A nos encontraríamos ante la dificultad de calcular el cociente entre irradiación media diaria sobre plano horizontal

y sobre el plano del generador. Este problema no es trivial y no se resuelve con una simple relación trigonométrica como se verá más adelante en [6.6.2].

Las curvas C'_A-C_S representan el lugar geométrico de todos los puntos correspondientes al mismo valor de LLP y se denominan líneas isofiables.

Cada punto del plano $C'_A - C_S$ representa un tamaño de un sistema fotovoltaico. Tal y como hemos definido los coeficientes, los mapas dependen exclusivamente de la localidad y no de la carga.

A la hora de representar los costes del sistema, estos representan una parábola cuyo mínimo nos dará la solución idónea al sistema.

3.1.1 Método numérico para el cálculo de la LLP

La relación entre la pareja de valores (C'_A, C_S) y su correspondiente LLP se establece mediante una simulación del sistema. Imaginemos un sistema que tiene todo el consumo durante la noche, el acumulador no tiene pérdidas y que la capacidad útil es la nominal.

El estado de carga del acumulador, en el momento de comenzar la noche del día "j" vendrá determinado por el estado de carga del día anterior "j-1" y la energía generada y consumida en el día "j".

SOC State of charge. Es la relación entre la capacidad instantánea de una batería, en general parcialmente cargada, y su capacidad nominal. Obviamente $0 < SOC < 1$.

$$SOC_j = SOC_{j-1} + \frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B} - \frac{L}{C_B} \quad (3.5)$$

Si suponemos que $C_B = C_U$ la fórmula anterior queda :

$$SOC_j = SOC_{j-1} + \frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B} - \frac{1}{C_S} \quad (3.6)$$

En el caso de que el sumatorio anterior tenga un resultado mayor que 1 significa que la batería está completamente cargada o lo que es lo mismo que $SOC_j = 1$.

La expresión anterior queda del siguiente modo:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B} - \frac{L}{C_B}, 1\right) \quad (3.7)$$

o bien:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{C'_A G_{dj}}{C_S G_{dm}(0)} - \frac{1}{C_S}; 1\right) \quad (3.8)$$

Si $C_B \neq C_U$ que es la situación más corriente puesto que la ($PD_{max} \neq 1$) la expresión anterior queda:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{C'_A G_{dj} PD_{max}}{C_S G_{dm}(0)} - \frac{PD_{max}}{C_S}; 1\right) \quad (3.9)$$

Supongamos que el generador auxiliar recarga el acumulador al principio de la noche si la energía almacenada en el acumulador es insuficiente para alimentar por completo a la carga.

$$E_{aux_j} = 0 \begin{cases} SOC_j \geq \frac{1}{C_S} \\ SOC_j \geq \frac{PD_{max}}{C_S} \end{cases} \quad C_B \neq C_U \quad (3.10)$$

La energía auxiliar necesaria se calcula suponiendo que la energía que se suministra a la batería cada día la carga por completo. Esta descripción de E_{aux_j} es totalmente arbitraria y conduce a las ecuaciones siguientes, si bien, una definición diferente de E_{aux_j} nos llevará a otras expresiones.

$$E_{aux_j} = (1 - SOC_j)LC_S \Leftrightarrow SOC_j < \frac{1}{C_S} \quad (3.11)$$

Y en el caso de $C_B \neq C_U$ tenemos que:

$$E_{aux_j} = \frac{(1 - SOC_j)LC_S}{PD_{max}} \Leftrightarrow SOC_j < \frac{PD_{max}}{C_S} \quad (3.12)$$

donde:

E_{aux_j} Es la energía suministrada el día "j" por el generador auxiliar.

Si esta simulación se lleva a cabo para un número de días, N , lo suficientemente largo, como para tener significado estadístico, el valor de la LLP correspondiente a un sistema autónomo en que hemos excluido el generador

auxiliar.

$$LLP = \frac{\sum_{j=1}^N E_{aux_j}}{NL} \quad (3.13)$$

La probabilidad de pérdida de carga depende, por tanto, de la pareja (C'_A, C_S) elegida.

Esta ecuación presupone la eficiencia η_G constante a lo largo del período considerado. Debido al largo período de tiempo del programa de simulación el estado inicial del estado de carga del acumulador no afecta a los resultados.

La ecuación anterior nos determina un valor de LLP para un par (C'_A, C_S) . En realidad el problema práctico es justamente el contrario, es decir, se fija un valor de LLP de trabajo y se trata de obtener el conjunto de valores (C'_A, C_S) para la LLP fijada.

3.1.2 Método analítico para el cálculo de la LLP

La forma de las líneas isofiables nos permite describirlas de forma analítica, evitando emplear un ordenador para abordar la tarea de dimensionar. El método propuesto relaciona los valores de C'_A con los de C_S para cada valor de LLP para una inclinación y emplazamiento.

El análisis del conjunto de líneas isofiables nos lleva a la conclusión de que todas ellas responden a la expresión:

$$C'_A = f C_S^{-u} \quad (3.14)$$

donde tanto f como u son dos parámetros que dependen del valor de LLP y de la localidad. El valor medio del coeficiente de determinación varía entre 0,98 y 0,93 y un máximo de 0,999. Estos valores ponen de manifiesto la exactitud de la ecuación anterior.

Para un valor de LLP , f representa el valor de C'_A para un $C_S=1$. El parámetro u tiene en cuenta el efecto de la persistencia de la radiación solar. A mayor persistencia, menor valor de u y viceversa.

También podemos obtener del análisis de la curvas isofiables la relación de f y u con la LLP .

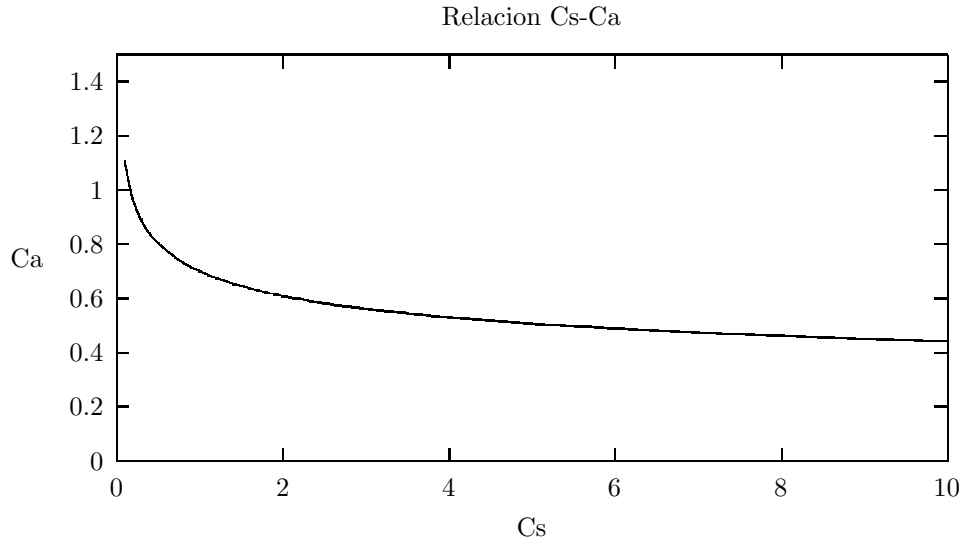


Figura 3.1: Relación entre Cs-Ca. $f=0.7$ $u=0.2$

$$f = f_1 + f_2 LLP \quad (3.15)$$

$$u = \exp(u_1 + u_2 LLP) \quad (3.16)$$

donde los parámetros u_1, u_2, f_1 y f_2 dependen tan solo de las condiciones meteorológicas y del emplazamiento.

3.1.3 Obtención de las líneas isofiables para una determinada LLP

Dada una LLP que denominaremos LLP_v ² fijamos un valor inicial de C_S ($C_S=1$) y elegimos un valor de C'_A aleatoriamente. Introducimos la pareja de valores (C'_A, C_S) en el modelo de simulación anteriormente descrito para obtener un valor de $LLP = g_1(C'_A, C_S)$.

Si el valor de LLP obtenido es mayor(menor) que el LLP_v aumentaremos (disminuiremos) el valor de C'_A y volveremos a aplicar el método de simulación tantas veces como sea necesario hasta obtener un valor de LLP igual a LLP_v .

²Nos referiremos a la probabilidad de pérdida de carga para sistemas fotovoltaicos con LLP_v y con LLP_w la correspondiente probabilidad para el sistema monovalente eólico.

$$C'_A = f \quad \text{con} \quad C_S = 1 \quad (3.17)$$

Una vez alcanzado el valor de LLP_v se obtiene el valor de f .

Se aumenta el valor de C_S a 2 y se elige de nuevo un valor de C'_A , la pareja (C'_A, C_S) nos conducirá a un nuevo valor de $LLP = g_2(C'_A, C_S)$. Tal y como se hizo para $C_S=1$ aplicaremos recurrencia para llegar hasta un C'_A que cumpla $LLP_v = g_2(C'_A, 2)$. Este procedimiento se repite hasta $C_S=n$ de tal forma que se verifique que:

$$C'_{A_{n-1}} - C'_{A_n} < 10^{-3} \quad (3.18)$$

Es decir, C'_A se aproxima asintóticamente a un valor constante. Las parejas (C'_A, C_S) se puede aproximar por una expresión del tipo:

$$C'_{A_n} = f C_{S_n}^{-u} \quad (3.19)$$

Esta relación nos permite obtener la pareja (f, u) que mejor aproxima las series de valores a su aproximación analítica. El error cometido se cuantifica a través del coeficiente de regresión de primer orden.

3.2 Método de Barra-Klein para la parametrización de la eficiencia de SMFV

Barra en 1984 [Barra 84] y Klein y Beckmann en 1987 [Klein 87] determinaron analíticamente la forma de las líneas isofiables de LLP para sistemas FV-batería. Las funciones se caracterizaron por la expresión.

$$C_{A_{V_o}} = C_{A_V}(C_S, G_{dm_{min}}(\alpha, \beta) K_p r) \quad (3.20)$$

$C_{A_{V_o}}$ Es la potencia fotovoltaica media normalizada para sistemas monovalentes.

$G_{dm_{(min)}}(\alpha, \beta)$ Es la irradiación media mensual mínima sobre el plano del array.

K_t Es el índice de claridad medio para el mes con el menor nivel de irradiación en un emplazamiento determinado.

El índice de claridad es un parámetro de la función de distribución de los datos de irradiación. La r representa el coeficiente de autocorrelación de las series de datos. Para la serie sintetizada se tomó un valor prefijado de $r=0.3$.

Un desarrollo empírico llega a la conclusión a que las curvas isofiables $LLP=1\%$ responden a la fórmula:

$$C_{A_{V_o}} = \frac{G_{ce}}{G_{dm}(0)} b_1 e^{\frac{b_2 - b_3 K_t}{C_s}} \quad (3.21)$$

$G_{ce}(0)$ Es el nivel de irradiación estándar de 1000 W/m^2

b_1, b_2, b_3 Resultan de un ajuste numérico de los datos de 20 emplazamientos y se obtienen los siguientes valores $b_1=0.86$ $b_2 =1.35$ días y $b_3=1.37$ días.

3.2.1 Correlación del Método de Barra

En la figura [3.2] se representa la correlación entre los valores que se obtienen por el modelo de simulación y los correspondientes de utilizar la expresión analítica propuesta por Barra.

3.2.2 Comentarios al método propuesto por Barra-Klein

Este modelo se puede usar cuando el tamaño de las baterías esta en el rango 1-10 días. Para valores mayores de batería el tamaño del generador fotovoltaico se aproxima linealmente a un valor asintótico. Este valor indica el tamaño del generador FV que alimenta el 99% del consumo de la carga más las perdidas en el almacenamiento[Hass 94]

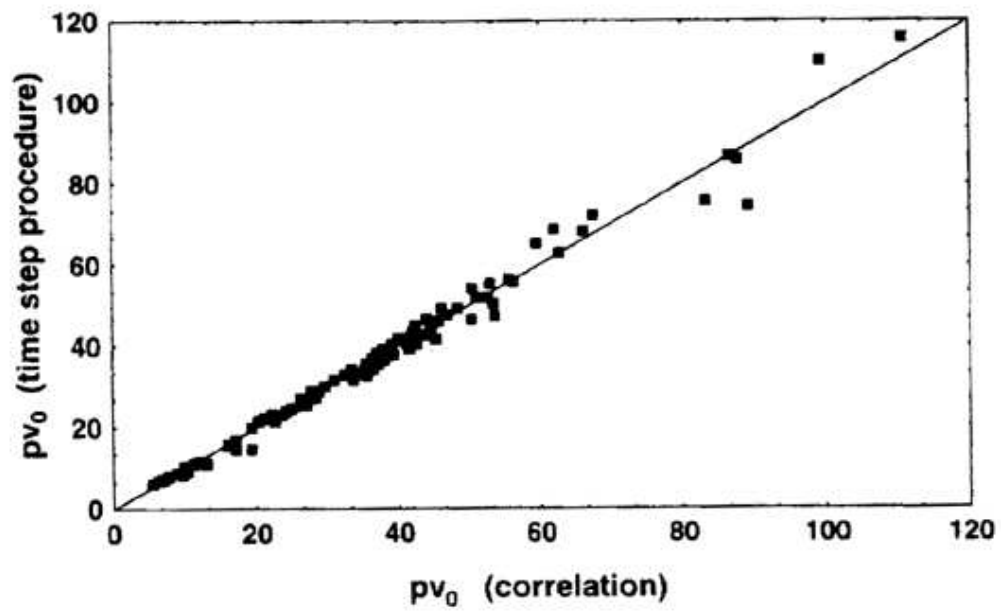


Figura 3.2: Correlacion en el metodo de Barra

Capítulo 4

Métodos de dimensionamiento para SME

4.1 Método de la LLP para SME. Primeras aproximaciones

Para parametrizar las curvas LLP_w de los sistemas con generador eólico se deben identificar las variables relevantes que caracterizan al viento. Igual que en el método de LLP para SMFV¹ se considera que estos sistemas vienen determinados por las condiciones del peor mes.²

Haciendo analogías con los SMFV es razonable pensar en el valor medio de la velocidad de viento y la función de distribución de las velocidades del viento como parámetros importantes. Estos parámetros tienen importancia en la cuantificación del potencial eólico. A continuación se describen los métodos empleados para cuantificar la energía eólica disponible y los parámetros estadísticos que caracterizan a esta fuente de energía.

4.1.1 Cuantificación del potencial eólico

Una masa de aire m que se mueve a una velocidad \vec{v} tiene una energía cinética:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (4.1)$$

¹Nos referiremos a SMFV y SME como sistemas monovalentes fotovoltaicos y eólicos respectivamente

²Se define como mes peor aquel que la relación oferta-demanda energética es menor

La energía por unidad de volumen de la corriente de aire es:

$$e = \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.2)$$

La potencia mecánica disponible en las masas de aire en movimiento es proporcional al cubo de la velocidad del viento y al área expuesta a la corriente de aire:

$$P_d = \frac{\rho v^3 A}{2} \quad (4.3)$$

Debido a la alta variación temporal del viento, el potencial eólico disponible se caracteriza mediante la potencia media disponible por unidad de área expuesta.

$$\frac{\overline{P_d}}{A} = \frac{\overline{\rho v^3}}{2} \quad (4.4)$$

P_d La energía que fluye por unidad de tiempo, o potencia disponible.

A Es la sección transversal de área A perpendicular a la corriente de aire.

ρ Es la densidad del aire $1,225 \frac{Kg}{m^3}$

Si solo se dispone de la velocidad media mensual, \overline{v} , la potencia media aprovechable será :

$$\frac{\langle P \rangle}{A} = \frac{\rho \overline{v}^3}{2} \quad (4.5)$$

donde la relación entre ellas es:

$$\frac{\overline{P_d}}{\langle P \rangle} = FPE = \frac{\overline{v^3}}{\overline{v}^3} \quad (4.6)$$

Por lo tanto, la potencia media eólica disponible en un lugar en el que sólo se conoce la velocidad media mensual \overline{v} será:

$$\overline{P_d} = \frac{FPE \rho A \overline{v}^3}{2} \quad (4.7)$$

La potencia aprovechable por una máquina eólica de área A frente a un flujo de aire a una velocidad v y densidad ρ es:

$$P_a = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p \quad (4.8)$$

FPE Factor de potencia eólico.

C_p Es el coeficiente de potencia y mide la fracción de energía extraída del rotor y es función de la velocidad del viento $C_p(v)$. Este valor tiene un límite teórico conocido como el "*límite de Betz*"

igual a 0.59 aunque en el ámbito práctico este valor ronda 0.4.

En la práctica y como se verá más adelante en [4.4.3] esta energía aprovechable se obtiene a partir de la función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento y la potencia normalizada de la turbina.

4.1.2 Parámetros representativos del potencial eólico

Para realizar un análisis exhaustivo de los datos de viento es necesario conocer: [IER 90]

1. Las condiciones generales de viento en un emplazamiento
 - (a) Condiciones meteorológicas (Temperatura, presión, humedad relativa, densidad del aire).
 - (b) Distribución de frecuencias de dirección.
 - (c) Distribución de frecuencias de velocidad.
 - (d) Variación temporal de la velocidad.
 - (e) Potencial eólico disponible.
2. Las características del viento para el funcionamiento del sistema.
 - (a) Perfil vertical de velocidad horizontal.
 - (b) Variación de la velocidad vertical.
 - (c) Relaciones entre viento vertical y horizontal.
 - (d) Factores de ráfaga.
 - (e) Características de turbulencia
 - (f) Desviación de la dirección.

El potencial eólico disponible se puede determinar conociendo la distribución de probabilidades de velocidades de viento. El conocimiento de una expresión analítica es extremadamente útil cuando no se dispone de la serie temporal o es necesario extrapolar datos de un lugar a otro, o de una altura a otra.

Según *Weibull*, la curva de frecuencias de la velocidad de viento puede ajustarse mediante una función del tipo:

$$f(v) = aCv^{C-1} \exp(-av^c) \quad v > 0, a > 0, C > 0, \quad (4.9)$$

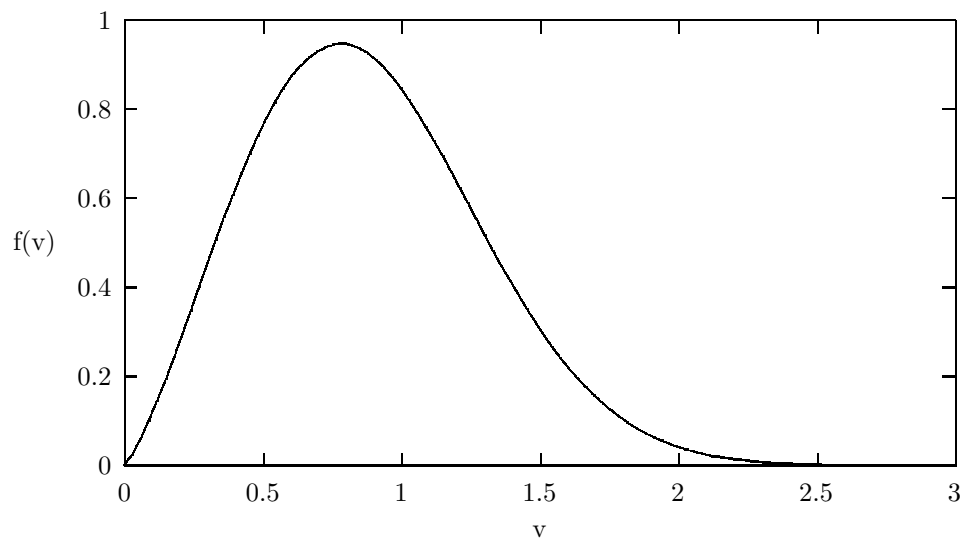


Figura 4.1: $f(v)$ de Weibull $a=1$ $C=2.3$

C Es el parámetro de forma

$a^{-1/C}$ Es el factor de escala.

Esta función tiene las siguientes características:

1. Para $C > 1$, la función tiene un máximo lejos del origen.
2. Para $C < 1$ es monótona decreciente.

3. Para $C=1$ la función es exponencial.
4. Para $C=2$ es la función de *Rayleigh* y para el caso de $C=3,5$ es una distribución normal.

El valor mas usual es $C = 2 \pm 0,5$.

La distribución de frecuencias acumuladas de Weibull $F(v)$ que da la probabilidad de una velocidad del viento igual o menor que v se obtiene integrando la función de distribución $f(v)$ resultando:

$$F(v) = \int_0^{+\infty} f(v)dv = 1 - \exp(-av^c) \quad (4.10)$$

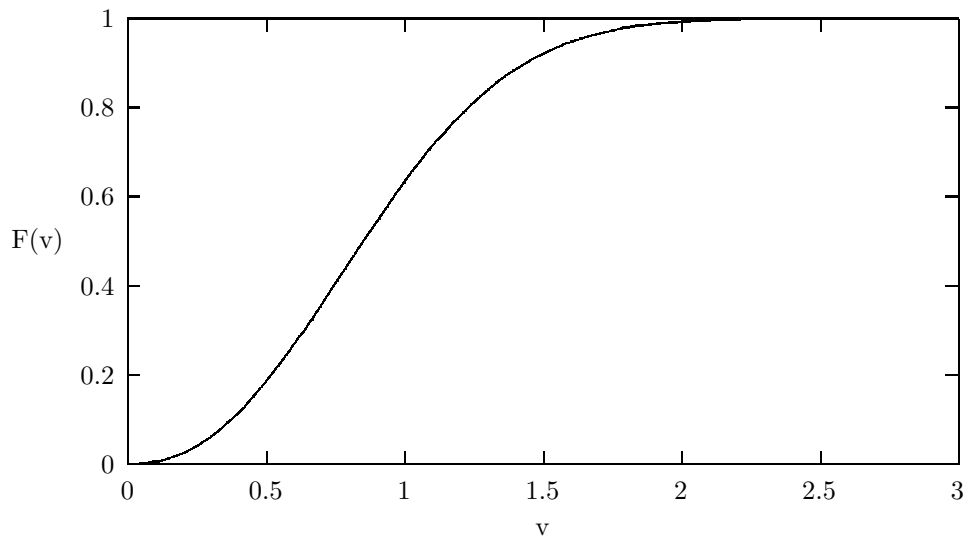


Figura 4.2: $F(v)$ de Weibull $a=1$ $C=2.3$

Los parámetros estadísticos de la función de Weibull en función de a y C son :

$$\sigma^2 = a^{2/C} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{C}\right) \right] \quad (4.11)$$

$$\overline{v^2} = a^{2/C} \Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right) \quad (4.12)$$

$$\text{Mediana} = a^{1/C} \ln(2)^{1/C} \quad (4.13)$$

$$\text{Moda} = a^{-1/C} \left(\frac{C-1}{C} \right)^{1/C} \quad (4.14)$$

La velocidad media \bar{v} y el *FPE* en función de a y C son :

$$FPE = \frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{C}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{C}\right)} \quad (4.15)$$

$$\bar{v} = a^{1/C} \Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right) \quad (4.16)$$

La energía media disponible es

$$\bar{P}_d = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{1}{a}\right)^{3/C} \Gamma\left(1 + \frac{3}{C}\right) \quad (4.17)$$

donde Γ es la función gamma que se define como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} s^{x-1} \exp(-cs) ds \quad (4.18)$$

y cumple que:

$$\begin{aligned} (x+1) &= x\Gamma(x) & x \in \mathbb{R} \\ \Gamma(n) &= (n-1)! & x \in \mathbb{Z}^+ \end{aligned}$$

4.2 Método para el cálculo de los parámetros de Weibull

El método de cálculo seguido para la determinación de los parámetros de Weibull es el siguiente:

Se definen dos ecuaciones:

$$x_1(C) = \Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right) \Gamma^{-1}\left(1 + \frac{1}{C}\right) \quad (4.19)$$

$$x_2(C) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{C}\right) \Gamma^{-2}\left(1 + \frac{2}{C}\right)$$

Substituyendo y operando en las ecuaciones anteriores se llegó a las siguientes expresiones para a y C :

$$x_1(C) = \frac{\bar{v}^2}{\bar{v}^2} \quad (4.20)$$

$$\left(\frac{1}{a}\right)^{1/C} = \frac{\bar{v}^2}{\bar{v}} x_2(C) \quad (4.21)$$

Este sistema de ecuaciones se resuelve por iteración, mediante aproximaciones sucesivas, suponiendo un valor de C y comprobando si el valor de a es el apropiado. El proceso de iteración termina cuando el cambio relativo de los parámetros es menor del 1%.

En contraste con la energía solar FV donde existe una relación entre el índice de claridad medio y la distribución de los valores de la serie, *no existe una dependencia entre la distribución de velocidades de viento y la velocidad media*, por lo que la función de distribución de velocidades debe ser representada por la función explícita anteriormente descrita.

4.2.1 Variaciones temporales del viento

Además de los parámetros que describen la distribución de velocidades de viento, deben tenerse en cuenta las fluctuaciones de la velocidad del viento. En los Wind Atlas la densidad espectral de potencia se da para el margen de frecuencias comprendidas entre 1/12000 a 1/16 (1/h). De estos valores un valor simple que se puede obtener es el de la autocorrelación de primer orden $r(1)$ de las medias diarias. [Langer 95]

Los movimientos de la atmósfera varían en un amplio rango de escalas temporales (entre segundos y meses) y espaciales (en centímetros a miles de kilómetros).

Mediante un análisis de series temporales de datos de viento en la región cercana al suelo, se observa que existen determinados ciclos o fluctuaciones de la velocidad de viento en diversos rangos de frecuencias. Estos ciclos están relacionados a las diferentes escalas del movimiento atmosférico, los cuales no sólo tienen relación con la radiación solar, sino también por las energías procedentes de los diversos intercambios dinámicos, térmicos y radiactivos que tienen lugar de manera simultánea en la atmósfera.

Una buena manera de separar las fluctuaciones a corto y largo plazo en la velocidad del viento es tener en cuenta el tiempo al que se refieren los análisis y características del viento. En relación con la distribución la zona de muy bajas frecuencias del espectro representa la energía asociada a los ciclos anuales motivados por el movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del sol; a continuación, la zona de bajas frecuencias intermedias constituye el rango meteorológico de macroescala y las variaciones se deben a los movimientos sinópticos a gran escala de las masas de aire que ocurre normalmente debido

a pasos de frentes ciclónicos y anticiclónicos con períodos de duración entre tres y cuatro días. En la zona de alta frecuencia del espectro las variaciones son debidas a las turbulencias, y forma parte el rango meteorológico de microescala como consecuencia del intercambio mecánico en las capas bajas de la atmósfera debido a las características superficiales del terreno, y los ciclos de energía están centrados alrededor del intervalo de un minuto.

Es importante tener en cuenta la ausencia de energía asociada en el intervalo entre diez minutos y dos horas. Una consecuencia práctica es que *se puede considerar un tiempo de promedio en este intervalo sin perder información característica de los ciclos típicos de energía*. La variación espectral de la energía cinética del viento representa cuantitativamente y cualitativamente la distribución de las frecuencias de variación del viento.

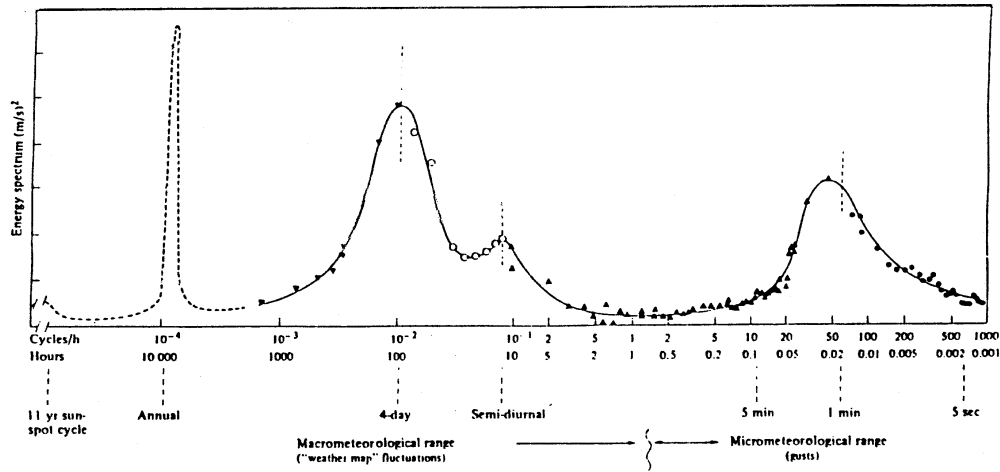


Figura 4.3: Espectro de la velocidad del viento

4.2.2 Caracterización de tamaño del generador eólico.

Usando estos parámetros se llega a que la potencia eólica para $LLP=1\%$ es una función del tipo.

$$C_{A_{w_0}} = C_{A_{w_0}}(C_S, C, \bar{v}_{min}, r(1)] \quad (4.22)$$

C Es el factor de forma

$r(1)$ Es el coeficiente de autocorrelación de primer orden [días]

Las series de datos se caracterizan por su factor de forma C y el valor de $r(1)$ para un determinada estación y sus diferentes valores medios de velocidad de viento. Se asume que estos valores incorporan el efecto de la altura del eje de la turbina sobre el suelo o la rugosidad del terreno.

Estas series se ajustan a una función:

$$C_{A_{w_o}} = a_1 \exp\left[\frac{1}{\bar{v}_{min}}\left(a_2 + \frac{a_3}{C_S}\right)\right] \quad (4.23)$$

Un ajuste de los valores de a_1 , a_2 y a_3 para las diferentes estaciones nos lleva a valores del estilo:

$$a_1 = 0.29 + 0.04C \quad (4.24)$$

$$a_2 = 10 - 0.47C \quad (m/s) \quad (4.25)$$

$$a_3 = -6.55 + 39.64r(1) \quad (m.dias/seg) \quad (4.26)$$

4.2.3 Notas al método de cálculo de la LLP para el SME

El error del ajuste aumenta con el tamaño de la turbina o lo que es lo mismo con la disminución de la velocidad de viento. Esto es debido a la alta sensibilidad de la potencia de salida de la turbina en este rango de velocidades de viento con el factor de potencia eólico.

Esta influencia se justifica si tenemos en cuenta que los perfiles de baja velocidad o que trabajan a bajo número de Reynolds tienen un comportamiento altamente dependiente de las características físicas del flujo de viento.

4.3 Métodos para la estimación de la energía producida por un aerogenerador de baja velocidad

Para la estimación de la energía producida por un aerogenerador se utilizan varios métodos en función de la fiabilidad requerida:

1. Modelo Estático

Se hace analítica o gráficamente a partir de la curva de duración del viento del lugar correspondiente y la curva de funcionamiento de aerogenerador.

La probabilidad de que existan velocidades de viento superiores a una determinada velocidad v_x viene dada por la expresión

$$P(v \geq V_x) = \exp\left(-\frac{V_x}{a^{-1/C}}\right)^C = \exp(-aV_x^C) \quad (4.27)$$

La curva de probabilidad de velocidades de viento da la probabilidad de ocurrencia, o el porcentaje estimado de tiempo que ocurre cada intervalo de velocidades.

La curva de funcionamiento de un aerogenerador da la potencia que suministra en cada intervalo de velocidad, es decir, la potencia en función de la velocidad de viento. De su comparación se obtiene la curva de probabilidad de ocurrencia de cada intervalo de potencia, cuya integral da la producción energética estimada para el período considerado.

$$E_{EL_w} = \int_0^{+\infty} f_o(v) P_W(v) dv \quad (4.28)$$

$f_o(v)$ Es la función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento (determinada por el factor de escala $a^{-\frac{1}{C}}$ y el factor de forma C)

$P_w(v)$ Es la curva de potencia de la turbina.

La ventaja de este método es su simplicidad, y puede utilizarse para una estimación global de la energía producida, así como para analizar su sensibilidad respecto a distintos parámetros de interés, como por ejemplo, las velocidades características de funcionamiento de la aeroturbina.

El principal inconveniente de este método es que está basado en una curva de potencia idealizada, ya que se ignoran efectos no estacionarios, pérdidas por cambios de dirección etc.

2. Modelo dinámico

Utiliza una serie temporal de datos de viento como entrada a un modelo numérico de funcionamiento de la aeroturbina. De este modo pueden obtenerse de una forma más fiable la energía producida, el comportamiento de la orientación, el número de arranques y paradas, así como simular estrategias de control de la aeroturbina.

4.4 Modelo estático de estimación de energía producida por un SME

Recordemos que para utilizar el método estático necesitamos la curva de duración del viento del lugar correspondiente y la curva de funcionamiento de aerogenerador.

4.4.1 Obtención de las curvas de duración

Para ilustrar como se obtienen las curvas de duración de viento se tomarán datos del “*Mapa Eólico Nacional*”³ que nos ofrecen información sobre las *curvas de duración del viento*. [MEN 90]

Las tablas que usamos en el modelo muestran valores mensuales de los parámetros de la función de Weibull, obtenidos como resultado de la aplicación de método de obtención de los parámetros de Weibull descrito en [4.1.2].

Los datos procedentes de una estación “tipo” se resumen en las tablas siguientes:

- $\langle A \rangle \cdot 10^4 = a10^4$
- $\langle C \rangle =$ Factor de forma
- $\langle AA \rangle =$ Factor de escala = $a^{-\frac{1}{C}}$
- $\langle V \rangle =$ Velocidad media = \bar{v}
- F.P.E. = Factor de potencia eólica.

³El MEN es consecuencia del Convenio de colaboración suscrito por la D.G. de innovación Industrial y Tecnológica, Centro de estudios de la Energía, ASINEL y el I.N.M.

Meses	%	V	FPE	W	$\langle A \rangle \cdot 10^4$	$\langle C \rangle$	$\langle AA \rangle$	$\langle V \rangle$	$\langle P \rangle \frac{W}{m^2}$
Enero	17,6	7,8	4,4	176	1100,2564	1,06	8	7,8	209
Febrero	19	9,4	3,58	247	600,3195	1,22	10	9,4	267
Marzo	19,2	10,2	2,97	261	407,683	1,33	11	10,2	291
Abril	19	10,1	2,67	229	310,9388	1,44	11	10,1	248
Mayo	18,8	8,6	2,97	156	499,8418	1,34	9	8,6	171
Junio	19,3	7,8	2,87	114	516,6276	1,38	9	7,8	123
Julio	18,7	7,5	3,11	109	613,795	1,33	8	7,5	115
Agosto	18,7	7,4	3,14	106	623,5327	1,33	8	7,4	111
Septiembre	18,3	6,8	3,66	97	927,2277	1,2	7	6,8	106
Octubre	17,9	7,7	3,99	153	877,3929	1,16	8	7,7	165
Noviembre	18,1	6,9	4,79	129	1325,689	1,04	7	6,9	147
Diciembre	18,1	8,3	4,6	220	1060,347	1,05	8	8,3	254
Primavera	19	9,6	2,91	216	407,6513	1,36	11	9,6	236
Verano	18,9	7,6	3,04	110	591,5917	1,34	8	7,6	118
Otoño	18,1	7,2	4,18	127	1053,8489	1,12	7	7,2	140
Invierno	18,2	8,5	4,2	213	914,3826	1,1	9	8,5	244
TOTAL	18,5	8,2	3,61	167	742,2292	1,2	9	8,2	18

Tabla 4.1: Valores del Mapa Eólico Nacional para Valladolid. Nudos

% HORAS= Porcentaje total mensual de horas de funcionamiento de la estación eólica. Su valor da una estimación de la fiabilidad o representatividad de los resultados.

En las tablas $\langle C \rangle$, $\langle A \rangle$, $F.P.E$ son adimensionales y los variables V , $\langle AA \rangle$, $\langle V \rangle$ están en nudos y m/seg respectivamente. Nudo= 1852 m/s.

La producción energética estimada para el período considerado se obtiene a partir de la curva de probabilidad de ocurrencia de cada intervalo de velocidad.

Si quisieramos obtener la producción energética *estacional* estas curvas de probabilidad de ocurrencia tienen una expresión analítica en función de los valores de la tabla anterior, que resulta de sustituyendo los valores del valor de forma C , $\langle C \rangle$ y escala $a^{-1/C}$, $\langle AA \rangle$ en la expresión analítica general llegando a que:

Meses	%	V	FPE	W	<A>.10 ⁴	<C>	<AA>	<V>	<P> $\frac{W}{m^2}$
Enero	17,6	4,01	4,4	176	1100,2564	1,06	4,12	4,01	209
Febrero	19	4,84	3,58	247	600,3195	1,22	5,14	4,84	267
Marzo	19,2	5,51	2,97	261	407,683	1,33	5,66	5,25	291
Abril	19	5,20	2,67	229	310,9388	1,44	5,66	5,20	248
Mayo	18,8	4,42	2,97	156	499,8418	1,34	4,63	4,42	171
Junio	19,3	4,01	2,87	114	516,6276	1,3	4,63	4,01	123
Julio	18,7	3,86	3,11	109	613,795	1,33	4,12	3,86	115
Agosto	18,7	3,81	3,14	106	623,5327	1,33	4,12	3,81	111
Septiembre	18,3	3,50	3,66	97	927,2277	1,2	3,60	3,50	106
Octubre	17,9	3,96	3,99	153	877,3929	1,16	4,12	3,96	165
Noviembre	18,1	3,55	4,79	129	1325,689	1,04	3,60	3,55	147
Diciembre	18,1	4,27	4,6	220	1060,347	1,05	4,12	4,27	254
Primavera	19	4,94	2,9	216	407,6513	1,3	5,66	4,94	236
Verano	18,9	3,91	3,04	110	591,5917	1,34	4,12	3,91	118
Otoño	18,1	3,70	4,18	127	1053,8489	1,12	3,60	3,70	140
Invierno	18,2	4,37	4,2	213	914,382	1,1	4,63	4,37	244
TOTAL	18,5	4,22	3,61	167	742,2299	1,2	4,63	4,22	184

Tabla 4.2: Valores del Mapa Eólico Nacional para Valladolid. m/seg

$$P(v \geq V_x) = \exp - \left(\frac{V_x}{a^{1/C}} \right)^C . T = \exp - \left(\frac{V_x}{\langle AA \rangle} \right)^{<C>} . T \quad (4.29)$$

donde T es el periodo de tiempo donde se describe la probabilidad de ocurrencia de velocidades. Para curvas estacionales este valor es de 2160 horas, correspondiente al número de horas en 3 meses.

Es decir, la probabilidad de que la velocidad de viento sea igual o mayor que cero es uno, que trasladado a tiempo equivale a decir que durante 2160 horas el viento supera esta velocidad.

Como se verá más adelante expresar la probabilidad en horas nos será de gran utilidad para calcular la potencia total disponible de origen eólico durante un periodo de tiempo (en este caso 3 meses).

4.4.2 Curvas de potencia. Producción de electricidad mediante sistemas eólicos

El comportamiento de un rotor aerodinámico viene caracterizado por los valores de tracción, par y coeficiente de potencia.

Estos valores vienen caracterizados en función del coeficiente adimensional λ . siendo:

$$\lambda = \frac{\omega . r}{v}$$

ω Es la velocidad angular de la turbina,

r Es el radio

v Es la velocidad del viento.

El coeficiente de potencia C_p expresa el porcentaje de energía contenida en el viento que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor.

Las curvas del coeficiente de potencia tienen unas formas características, se anulan para $\lambda = 0$ y para λ_{max} de operación y el valor de λ donde C_p alcanza su valor máxima se denomina λ_{opt} (valor óptimo o de diseño).

Clasificación de aeroturbinas y aplicaciones

Glauert estableció el valor de la envolvente ideal de actuaciones de aeroturbinas en función de la relación de velocidades λ , mostrando que el coeficiente de potencia tiende asintóticamente al valor del límite de Betz 0.592 para altos valores de λ . [MEE 90]

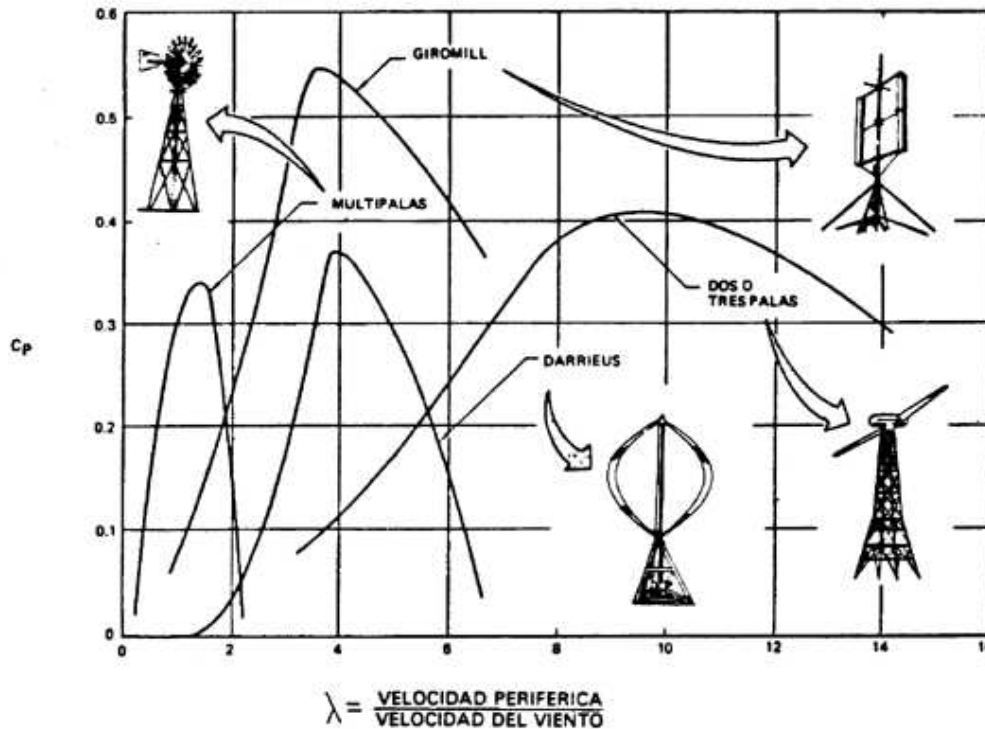


Figura 4.4: Distintos tipos de aerogeneradores

Dentro de este criterio de clasificación aparecen dos grupos de aeroturbinas.

- *aeroturbinas lentas:* rotores Savonius y multipalas, cuyo punto de diseño está alrededor de la unidad y que dejan de funcionar para valores superiores a 2.
- *aeroturbinas rápidas:* principalmente rotores de eje horizontal de un número reducido de palas, cuyo punto de diseño se sitúa alrededor de

8 - 10, manteniendo valores elevado de C_p es un intervalo alrededor del punto de diseño.

En cuanto al coeficiente de par C_q , las llamadas aeroturbinas lentas presentan el máximo par de arranque a baja velocidad con un par de arranque elevado, lo que las hace muy apropiadas para aplicaciones tales como bombeo de agua. Por el contrario las aeroturbinas rápidas tienen un par máximo a elevadas revoluciones, el par de arranque es muy pequeño incluso nulo, por lo que necesitan generalmente algún dispositivo adicional para el arranque.

Existe una relación entre el C_p y los parámetros de diseño: diámetro D , núm. de palas b , tipo de perfil $\left(\frac{C_L}{C_D}\right)_{max}$, relación de velocidades $\lambda = 1/60nD/V$, r.p.m de operación de la máquina n, AF , número de Reynolds $Re = \frac{\rho v l}{\mu}$, espesor relativo $\frac{t}{c}$, ángulo de torsión, θ ángulo de paso ν .

Es decir:

$$C_p = f\left(D, b, \frac{C_L}{C_D}, \lambda, AF, Re, \frac{t}{c}, \theta, \nu\right) \quad (4.30)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (4.31)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (4.32)$$

donde:

L Es la fuerza de sustentación aerodinámica.

D Es la fuerza de resistencia aerodinámica.

$\frac{C_L}{C_D}$ Es la fineza del perfil.

C_L Es el coeficiente de sustentación aerodinámica.

C_D Es el coeficiente de resistencia aerodinámica.

$AF = \frac{S_{palas}}{S_{rotor}}$ Es el factor de operación.

l Es la longitud característica en rotores.

μ Es la viscosidad del aire.

- $\frac{t}{c}$ Es el espesor relativo del perfil. t es el espesor máximo y c es la cuerda.
- θ Es la torsión geométrica. Ángulo entre los perfiles de la raiz y punta.
- ν Es el ángulo de paso. Ángulo entre la cuerda del perfil de raiz y el plano perpendicular al eje del rotor.

Las aeroturbinas normalmente utilizadas para la generación de energía eléctrica o aerogeneradores son las denominadas aeroturbinas rápidas, de tres, dos e incluso una pala ya que, la potencia extraíble del viento no depende del número de palas sino de la sección barrida por ellas.

Existen varias razones que justifican esta elección: al tener una velocidad específica más alta que las multipalas, se acoplan mejor a los generadores eléctricos existentes. Las cajas multiplicadoras son así más ligeras y ello se traduce en una disminución del coste total de la máquina. Últimamente, existen fabricantes que comercializan máquinas de velocidad variable y que no incluyen cajas de multiplicación debido al especial diseño de los generadores multipolos que incluyen.

Aunque el C_q de una aeroturbina es bajo, es suficiente para vencer el del generador. El C_q suele ser suficiente para hacer girar el conjunto rotor-multiplicador- generador. Otra ventaja es que cuando está parada la máquina, las cargas debidas al viento son menores que en las multipalas debido a su menor solidez.

4.4.3 Obtención de la potencia eléctrica disponible. Modelo Estático.

Conocida la función de probabilidad de viento $f_o(v)_T$ durante un periodo T considerado y la curva de potencia $P_W(v)$ del aerogenerador⁴ estamos en condiciones de conocer la energía total disponible a través de evaluar la expresión:

$$E_{EL_w} = \int_0^{+\infty} f_o(v)P_W(v)dv$$

Evaluar la integral anterior presupone conocer una expresión analítica de la curva de potencia del aerogenerador. La curva de potencia del aerogenerador es una curva experimental y por tratarse de una curva continua y

⁴esta curva de potencia la obtenemos del fabricante

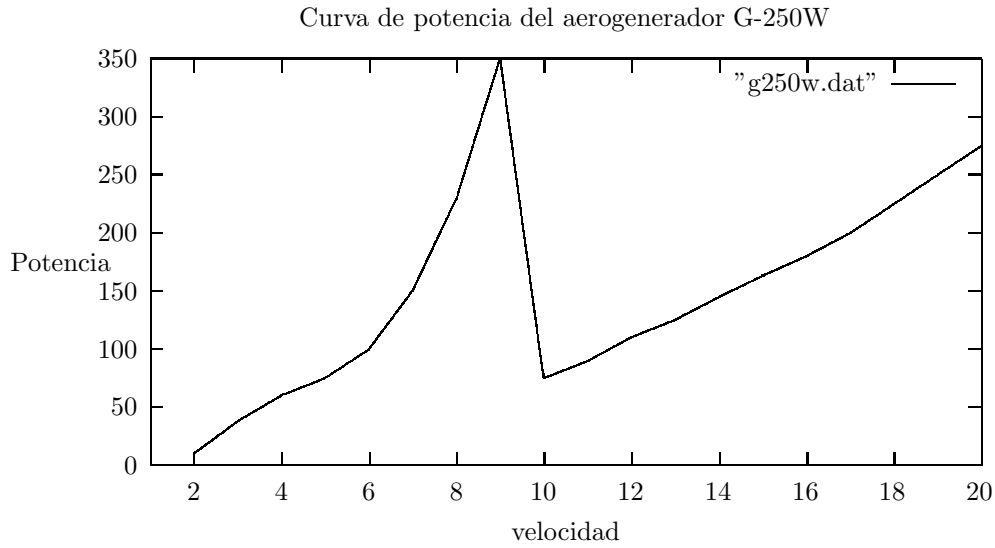


Figura 4.5: Curva de potencia del G-250W

derivable de primer orden se puede aproximar por una polinomio de grado “ p ”

$$Polyn(v)_p = P_W(v) = a_p v^p + a_{p-1} v^{p-1} + \dots + a_2 v^2 + a_1 v^1 + a_o \quad (4.33)$$

A la hora de evaluar la integral nos encontramos con una integral del estilo

$$E_{EL_w} = \int_0^{+\infty} a C v^{C-1} \exp(-av^c) [a_p v^p + a_{p-1} v^{p-1} + \dots + a_1 v^1 + a_o] dv \quad (4.34)$$

Sin embargo se puede resolver este problema sin necesidad de obtener la aproximación polinómica de la curva de potencia de aerogenerador procedemos del siguiente modo:

Conocemos la expresión de la distribución de frecuencias, es decir, dada una velocidad de viento V_x conocemos el número de horas durante la estación en la que la $v > V_x$. Estas parejas (V_x, t_x) son el resultado de evaluar:

$$V_x \Rightarrow t_x$$

$$P(v \geq V_x)_{horas} = T.exp - \left(\frac{V_x}{a^{-1/C}} \right)^C = T.exp - (aV_x^C) = t_x \quad (4.35)$$

donde T es el periodo de tiempo donde se evalúa la función de distribución.

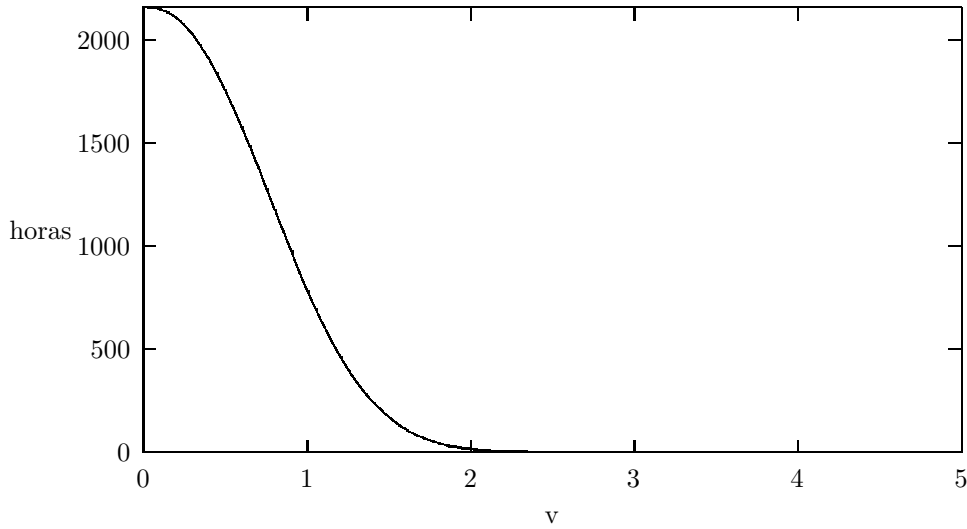


Figura 4.6: $P(V > V_x)$ [h]

En consecuencia, a partir de la función inversa se obtienen los (t_i, v_i) bastará, por tanto, con evaluar:

$$T_x \Rightarrow V_x$$

$$V(t_x)_{m/seg} = \langle AA \rangle \cdot \exp\left(\frac{\ln(-\ln \frac{t_x}{T})}{\langle C \rangle}\right) \quad (4.36)$$

donde T es el periodo de tiempo donde se evalúa la función de distribución.

Se fija número n de subintervalos de velocidad, v , tal que $0 < v_i < v_{max}$ con $i \in [1, 2, \dots, n]$, tal que, n debe ser lo suficientemente grande para poder afirmar que la curva de potencia del aerogenerador se puede aproximar en cada subintervalo de v por una línea recta.

La potencia total se obtiene de calcular el área de la curva $P_w(t_i)$

$$E_{EL_w} = \int_0^T P_w(t) dt = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} [t_{i+1} - t_i] [P_{t_{i+1}} - P_{t_i}]$$

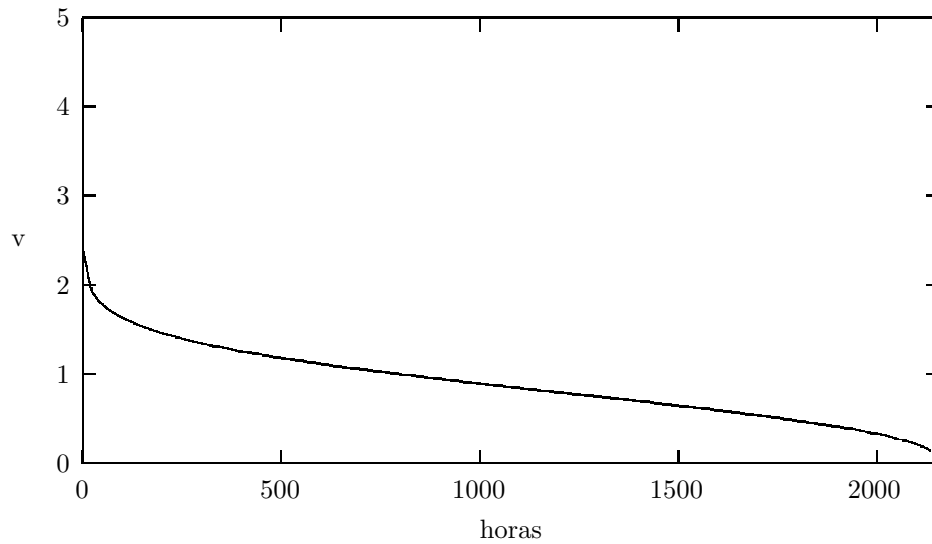


Figura 4.7: T(horas) [v]

En resumen, para calcular la energía eléctrica que suministra un aerogenerador será necesario integrar la curva de potencia a lo largo del T considerado. La curva de potencia es una curva experimental que liga la potencia de salida del aerogenerador con la velocidad del viento. Para obtener la curva de potencia en función del tiempo utilizaremos la función inversa de la densidad de probabilidad de viento que liga tiempos con velocidades. Esta relación se resume en la ecuaciones siguiente:

$$P(v \geq V_x)_T \stackrel{P_T^{-1}}{\Leftrightarrow} V(t_x)$$

$$E_{EL_w} = \int_0^T P_W(t) dt = \int_0^T P_W[V(t)] dt$$

Si en lugar de calcular la potencia disponible en cada estación quisiéramos calcular la potencia disponible en cada mes se utilizará el mismo procedimiento teniendo en cuenta que la función de densidad de probabilidad será $f_o(v)_{mes}$ y que la integral se define entre $t = 0$ y $t_{mes}=720$ horas.

Una gráfica de $P(t)$ obtenida por este método se recoge en la Figura [4.8]

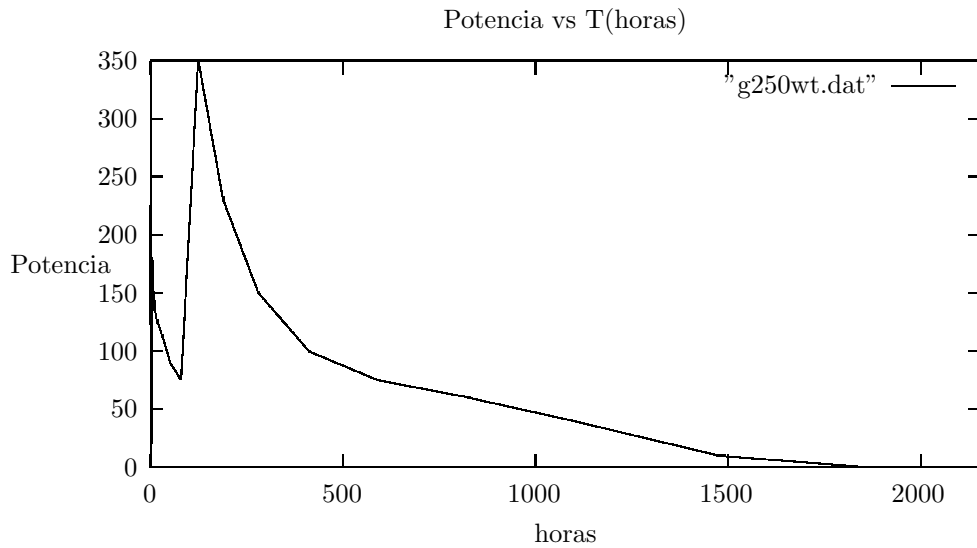


Figura 4.8: Potencia [h]

4.4.4 Inconvenientes del modelo estático frente al LLP para SME

Este método de dimensionamiento al no basarse en series temporales de viento no nos permite hablar de LLP_w , es decir, solo conocemos la energía que suministra el SME durante el periodo considerado.

Por otro lado la estimación de energía producida se basa en la curva de potencia de un aerogenerador, es decir, no obtenemos un método que relacione la energía producida con algún parámetro característico de la curva de potencia de cualquier aerogenerador.

4.4.5 Generalización del modelo estático para aerogeneradores de una misma serie

El modelo estático necesita conocer los valores $a^{-1/C}$, C , $P_W(v)$ para obtener la E_{ELW} , donde $P_W(v)$ es la curva de potencia del aerogenerador que se define como un conjunto de valores experimentales $[v, P(v)]$.

Una expresión ideal de la energía eléctrica que suministra un aerogenera-

por cualquiera debería expresar la E_{ELW} como una función que relacione los parámetros del potencial eólico (factor de forma, factor de escala) y un conjunto de parámetros del modelo de turbina (parámetros electro-mecánicos).

Energía eléctrica suministrada por una serie de aerogeneradores en función de la P_{NOM} y la f_{oT} .

Un primer paso hacia una expresión más general de la energía eléctrica disponible consiste en intentar expresar la energía producida en un periodo temporal, T , con una distribución de vientos $f_o(v)$ en función de la P_{NOM} del aerogenerador.

Definimos como *curva de potencia normalizada* la que expresa la relación entre velocidad de viento y potencia eléctrica a la salida del aerogenerador respecto la potencia nominal, $\frac{P_{out}}{P_{NOM}}$.

La curva $[v, P_{norm}]$ es un parámetro característico de una serie de aerogeneradores de la misma familia.⁵

Para una serie de aerogeneradores la expresión que relaciona la energía eléctrica producida en un periodo T , con la $f_o(v)$ y la P_{NOM} es:

$$\begin{aligned} E_{ELw} &= P_{NOM} \int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}(v) dv \\ E_{ELw} &= P_{NOM} \phi_{fT,serie} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Llamaremos $\phi_{fT,serie}$ al resultado de evaluar $\int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}$. Esta primera generalización significa que una vez conocido el término $\phi_{fT,serie}$ bastará sustituir por la P_{NOM} del aerogenerador para obtener la energía eléctrica que suministra durante el periodo, T considerado.

⁵Se denomina “aerogeneradores de la misma familia o serie” al conjunto de máquinas que presentan características cualitativas semejantes, a saber, mismo número de palas, perfil aerodinámico, características de generador y rectificador etc. Este tipo de aerogeneradores se fabrican para que la curva de potencia normaliza de la serie sea independiente de la potencia nominal

Obtención de la P_{NOM} de un aerogenerador en función de sus parámetros constructivos y de la velocidad del viento

Un segundo paso consiste en intentar relacionar la potencia eléctrica nominal de la máquina con los parámetros constructivos. Como se ha visto anteriormente, la potencia mecánica aprovechable de una turbina es función del coeficiente de potencia, el cubo de la velocidad, el área barrida por las palas y la densidad del aire y que existe una relación entre el C_p y los parámetros de diseño: diámetro D , número de palas b , tipo de perfil $\left(\frac{C_L}{C_D}\right)_{max}$, relación de velocidades $\lambda = 1/60nD/V$, r.p.m de operación de la máquina n , AF , número de Reynolds $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$, espesor relativo $\frac{t}{c}$, ángulo de torsión, θ , ángulo de paso ν .

Es decir:

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \\ C_p &= f\left(D, b, \frac{C_L}{C_D}, \lambda, AF, Re, \frac{t}{c}, \theta, \nu\right) \\ P_{a_{EL}} &= P_a \cdot P_{em} \end{aligned} \quad (4.38)$$

donde :

P_a Potencia mecánica aprovechable de una máquina eólica. Es igual a la potencia disponible por el coeficiente de potencia.

C_p Coeficiente de potencia de una máquina eólica. Es el resultado de dividir la potencia mecánica aprovechable por la potencia eólica disponible.

$P_{a_{EL}}$ La potencia eléctrica aprovechable es igual a la potencia mecánica disponible en el generador de origen eólico por las pérdidas electromecánicas.

P_{em} Pérdidas electromecánicas del generador eléctrico.

Si bien, se pueden encontrar relaciones entre la potencia eléctrica a la salida de un generador de corriente continua o de corriente alterna y la potencia mecánica aplicada a dicho generador, P_{em} , la mayor dificultad se encuentra en la relación entre C_p y los parámetros de diseño.

Aunque existen métodos que ligan el coeficiente de potencia de un aerogenerador con sus parámetros constructivos, desde el punto de vista práctico el camino a seguir es el inverso: se parte de una curvas experimentales y se

obtiene la energía que suministran dichos aerogeneradores.

Buscar una relación entre el C_p y los parámetros de diseño no es una tarea fácil, máxime en aerogeneradores de tamaño pequeño como es el caso de aeroturbinas de menos de 10 metros de diámetro.

Capítulo 5

Método de dimensionamiento Langer-Beyer para SHEFV

5.1 Consideraciones previas

Antes de entrar a intentar parametrizar la fiabilidad de los sistemas híbridos se utilizarán las siguientes premisas:

- Se asumirá que la respuesta del generador FV es lineal, es decir, de eficiencia constante.
- Que el generador eólico es una turbina pequeña y que se representa por su curva normalizada en función de la velocidad del viento [m/s].
- Que la batería se modela como una eficiencia constante del 80%.
- La carga se asume constante.
- Los tamaños de los generadores fotovoltaico y eólico se normalizan respecto a la carga y se denominan C_{A_v} y C_{A_w} respectivamente.
- El tamaño de la batería se define como la capacidad efectiva dividida entre la carga $\frac{C_U}{L} = C_S$ [días].

La fiabilidad del sistema se evalúa a través de una simulación temporal en intervalos horarios procedente de una serie de datos meteorológicos. La *LLP* se encargará de cuantificar la fiabilidad del sistema. La *LLP* se define en este caso como las horas sin energía en la carga dividido entre las horas totales que dura la simulación. Las configuraciones que satisfacen la condición de $LLP < 1\%$ son seleccionadas utilizando un procedimiento iterativo similar al

descrito en los SMFV. Para un tamaño de batería a medida que aumentamos el generador eólico es necesario un generador fotovoltaico de menor tamaño y viceversa.

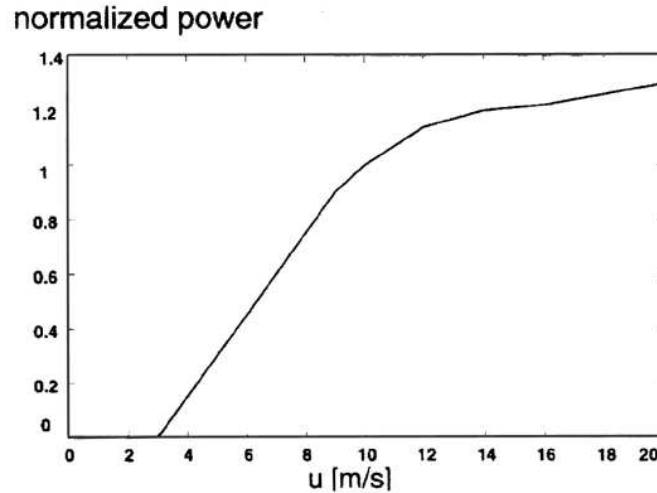


Figura 5.1: Curva normalizada del aerogenerador según Nottebaum

5.2 Datos de entrada del método-Series sintéticas

Respecto a los datos de radiación, las medias mensuales de irradiación diaria se pueden obtener de los Atlas de Radiación de numerosos emplazamientos. Las medias mensuales de irradiación diaria $G_{dm}(0)$ son los únicos datos necesarios para la generación de una serie horaria de índices de claridad. Se asume que los valores diarios para todos los meses con un valor medio de índice de claridad determinado siguen una única función de distribución descrita por Gordon y Reddy (1988)[Gordon 98] y [Hollands 98]

La característica principal de estas series es que conservan propiedades estadísticas cuya validez se presupone universal, dado que dichos valores estadísticos se cumplen en las series históricas disponibles.

La persistencia de la radiación se describe a partir de una autorregresión de primer orden, y la función de distribución del índice de claridad de la

atmósfera tiene una forma exclusivamente asociada a su valor medio durante el periodo considerado.

Los datos de velocidad de viento son sintetizados de acuerdo con el procedimiento descrito por Beyer y Nottebaum (1993)[Beyer 93] El modelo de Nottebaum necesita datos meteorológicos para generar la serie sintética de valores horarios. Estos datos meteorológicos son la velocidad media mensual y la velocidad cúbica media mensual que ajustará la función de distribución.. Para modelar la variación estocástica de la velocidad del viento se utilizará la densidad espectral de potencia.

Los dos procedimientos de generación de series de irradiación y velocidades de viento se implementan por separado o lo que es lo mismo las fluctuaciones aleatorias del viento y de la irradiación tiene una correlación cruzada nula.

5.3 Simulación temporal y variación de las configuraciones

Los sistemas híbridos para un determinado valor de LLP se caracterizan por la terna $[C_{A_v}, C_{A_w}, C_S]$. Para encontrar una función que relacione esta terna con la LLP se lleva a cabo una nueva aproximación que parte de las premisas siguientes:

- Para $C_{A_w} = 0$ ó $C_{A_v} = 0$ el tamaño del otro componente se refiere al valor obtenido del enfoque monovalente del sistema para un determinado valor de C_S .
- Para los valores intermedios la forma de la curva isofiable debería depender de los parámetros que describen la relación mutua entre los recursos solares y eólicos de un determinado emplazamiento.

Como se ha demostrado anteriormente los tamaños de los generadores de los sistemas monovalentes se pueden describir a partir de las condiciones meteorológicas del "mes peor". Luego parece razonable caracterizar las curvas isofiables para pequeñas desviaciones sobre los valores de C_{A_w} y C_{A_v} teniendo en cuenta el otro recurso en el mes respectivo.

En la zona de $C_{A_v} = C_{A_{v_o}}$, $C_{A_w} = 0$, las curvas isofiables *LLP* presentan un ajuste lineal. Para compensar una pequeña disminución del generador FV es necesario un incremento proporcional del generador eólico.

Esta relación lineal asume que el tamaño de C_S es lo suficientemente grande para que la energía que deja de suministrar el generador fotovoltaico debido a una disminución del mismo tenga que ser asumida por un aumento del generador eólico.

Esto conduce a la relación siguiente:

$$C_{A_w} = C_{A_{w_1}} \frac{dC_{A_v}}{C_{A_{v_o}}} = C_{A_{w_1}} \left[1 - \frac{C_{A_v}}{C_{A_{v_o}}} \right] \quad (5.1)$$

Donde $C_{A_{w_1}}$ nos indica el tamaño del generador eólico con una producción igual al consumo de la carga durante el mes de peor irradiación.

Este valor se puede determinar a través de la expresión:

$$C_{A_{w_1}} = \frac{1}{\int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}(t) dv} \quad (5.2)$$

$f_o(v)$ Es la función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento para el mes peor (determinada por el factor de escala $a^{-\frac{1}{C}}$ y el factor de forma C)

$P_{W_{norm}}(v)$ Es la curva de potencia normalizada de la turbina.

En la zona de $C_{A_w} = C_{A_{w_o}}$, $C_{A_v} = 0$ es más difícil encontrar una relación lineal.

Pero podemos encontrar una relación exponencial que para valores pequeños C_{A_v} se aproxima a una relación lineal equivalente a la ecuación:

$$C_{A_w} = C_{A_{w_o}} \cdot \exp(-cC_{A_v}) \quad (5.3)$$

El parámetro c puede ser interpretado como el valor inverso de un generador fotovoltaico, $C_{A_{v_x}}$.

El valor $C_{A_{v_x}}$ se obtiene del siguiente modo. En primer lugar partimos de una fórmula general:

$$C_{Aw} = C_{Aw_1} \left[1 - \frac{C_{Av}}{C_{Av_o}} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{C_{Av}}{C_{Av_x}}\right) \right] + C_{Aw_o} \exp\left(-\frac{C_{Av}}{C_{Av_x}}\right) \quad (5.4)$$

Usando esta relación se obtienen diferentes valores de $\frac{1}{C_{Av_x}}$ para diferentes condiciones meteorológicas que se ajustan a un valor prefijado de *LLP*. Cuando se intenta correlar el valor $\frac{1}{C_{Av_x}}$ con los valores medios de irradiación para los meses de peores condiciones de viento tenemos que tener en cuenta que al contrario que en el caso de la irradiación el peor mes en términos de velocidad media de viento es muchas veces difícil de determinar.

Muchos meses pueden presentar valores de velocidad media muy parecidos. Por esta razón se define un valor medio de irradiancia $\overline{G_x}$ como la media de las irradiaciones medias mensuales de los meses con valor medio de velocidad de viento que no se desvíen más $0.15 \frac{m}{seg}$ sobre la velocidad media mensual mínima absoluta.

Por ejemplo, si la velocidad media mínima mensual es de $3 \frac{m}{seg}$, $\overline{G_x}$ se obtiene como la media de las irradiaciones medias mensuales de los meses cuya velocidad de viento media este comprendida entre 3 y $3.15 \frac{m}{seg}$.

La mejor ajuste lineal de la relación $\left[\frac{1}{C_{Av_x}} - \overline{G_x} \right]$ es:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{Av_x}} &= -0.22 + 4.17 \frac{\overline{G_x}}{G_s} \\ G_s &= 1000 \frac{W}{m^2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Esta ecuación revela que tamaño de C_{Av_x} es menor que del generador FV necesario como fuente principal de energía igual a la carga para una $\overline{G_x}$ dada. Usando el modelo simple FV este tamaño sería de $\frac{G_{ce}}{G_x}$. Esto implica que una perdida de la cantidad de energía total causada por la disminución del tamaño de la turbina puede ser compensada por la adición de un generador FV con una ganancia de energía menor. Esto se explica por el hecho que para bajas velocidades de viento el modelo temporal de suministro de energía eólica es muy desfavorable.

Para baterías pequeñas y para alta fiabilidad la energía total producida por la turbina debe ser mayor que el consumo de la carga. En estas condiciones cuando reducimos el tamaño del generador eólico sólo una parte de

la pérdida de producción de energía debe ser sustituida por un generador FV.

5.4 Resumen del método Langer-Beyer para SHEFV

5.4.1 Parámetros necesarios para el método de LLP para SHEFV

Datos relacionados con el mes de peores condiciones de viento.

- $\overline{v_{min}}$: velocidad media mensual (m/s)
- FPE : factor de potencia eólico (epf)
- $r(1)$: autocorrelación de primer orden.
- $\overline{G_x}$: Valor medio de irradiación solar de los meses con menor velocidad de viento $\frac{W}{m^2}$.

Datos relacionados con el mes de peores condiciones de radiación.

- $G_{dm_{min}}$: Valor medio mínimo de irradiación sobre el plano del array.
- K_t : Índice de claridad.
- \overline{v} : velocidad media mensual (m/s)
- FPE : factor de potencia eólico (epf)

5.4.2 Cálculo de la potencia normalizada para los SMFV y SME

Calculamos la $C_{A_{vo}}$ y la $C_{A_{wo}}$ a través de las expresiones:

Método Klein para el cálculo de $C_{A_{vo}}$

$$C_{A_{vo}} = \frac{G_{ce}}{G_{dm}(0)} b_1 e^{\frac{b_2 - b_3 K_t}{C_S}} \quad (5.6)$$

$G_{ce}(0)$ Es el nivel de irradiación estándar de $1000 W/m^2$

b_1, b_2, b_3 Resultan de un ajuste numérico de los datos de 20 emplazamientos y se obtienen los siguientes valores $b_1 = 0.86, b_2 = 1.35das, b_3 = 1.37das$.

Método Langer para el cálculo de $C_{A_{wo}}$

$$C_{A_{wo}} = a_1 \exp\left[\frac{1}{\bar{v}_{min}} \left(a_2 + \frac{a_3}{C_S}\right)\right] \quad (5.7)$$

Un ajuste de los valores de a_1 , a_2 y a_3 para las diferentes estaciones nos lleva a los valores del estilo:

$$a_1 = 0.29 + 0.04C \quad (5.8)$$

$$a_2 = 10 - 0.47C \quad (m/s) \quad (5.9)$$

$$a_3 = -6.55 + 39.64r(1) \quad (m.dias/seg) \quad (5.10)$$

5.4.3 Cálculo de los parámetros intermedios

Cálculo de $C_{A_{w1}}$

$$C_{A_{w1}} = \frac{1}{\int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}(v) dv} \quad (5.11)$$

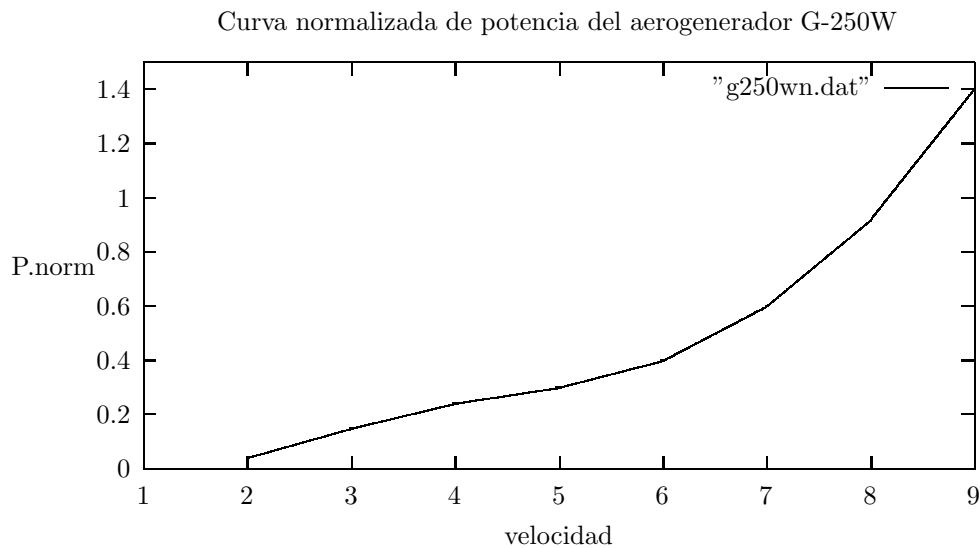


Figura 5.2: Potencia Normalizada

$f_o(v)$ Es la función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento para el mes peor (determinada por el factor de escala $a^{-\frac{1}{C}}$ y el factor de forma C)

$P_{W_{norm}}(v)$ Es la curva de potencia normalizada de la turbina.

Cálculo de $C_{A_{vx}}$

$$\frac{1}{C_{A_{vx}}} = -0.22 + 4.17 \frac{\overline{G_x}}{G_s} \quad (5.12)$$

$$G_s = 1000 \frac{W}{m^2}$$

5.4.4 Cálculo de la relación final

Cálculo de la relación final $C_{A_w} - C_{A_v}$

$$C_{A_w} = C_{A_{w1}} \left[1 - \frac{C_{A_v}}{C_{A_{v0}}} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{C_{A_v}}{C_{vx}}\right) \right] + C_{A_{w0}} \exp\left(-\frac{C_{A_v}}{C_{A_{vx}}}\right) \quad (5.13)$$

Capítulo 6

Método propuesto para dimensionar SHEFV

A continuación se enumeran algunos de los inconvenientes del método propuesto por Langer-Beyer para el dimensionado de sistemas híbridos.

6.1 Inconvenientes del método Langer-Beyer

6.1.1 Aspectos relacionados con el método de Barra

Tanto el método de Barra como el método de Bartoli exhiben diferencias que exceden lo esperable de la variabilidad del clima, en algún intervalo de interés de C_S . El modelo de Barra conduce sistemáticamente al sobredimensionamiento de los generadores. El modelo de Bartoli muestra una sensibilidad demasiado pequeña al tamaño de la batería; es decir, las variaciones de C_S , manteniendo constante la LLP no se refleja en variaciones del tamaño del generador FV, C'_A . [Egido 92]

6.1.2 Aspectos relacionados con la normalización de la turbina

En el método de Beyer y Langer se asume que los aerogeneradores de trabajo tienen una curva de potencia del estilo que recoge Nottebaum [Nottebaum 94]. Considerar que cualquier aerogenerador tiene una curva normalizada semejante a la propuesta por Nottebaum supone asumir que la curva de potencia es independiente de los parámetros de diseño lo cual es falso. La curva de potencia de un aerogenerador es altamente dependiente de los parámetros

electro-mecánicos del sistema.

Como se ha indicado anteriormente el coeficiente de potencia, C_p , es altamente dependiente de los parámetros de diseño y es un parámetro crítico en cualquier diseño de un aerogenerador. Pequeñas variaciones de la torsión o del espesor de un perfil pueden conducir a curvas de potencia totalmente diferentes.

6.1.3 Aspectos relacionados con la interpretación del tamaño del aerogenerador

El método propuesto por Langer-Beyer permite obtener los valores de $[C_{Aw}, C_{Av}]$ una vez fijado el valor de C_S para una $LLP = 1\%$.

Los resultados de salida del método son valores normalizados respecto a la carga L . En el caso del subsistema fotovoltaico el número de módulos se obtiene al obtener el valor de A_G de la expresión [3.1] una vez elegido el módulo con el que vamos a trabajar. El problema nos los encontramos al interpretar el valor de C_{Aw} .

$$C_{Aw} = \int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}(v) dv \quad (6.1)$$

Un valor, por ejemplo, de $C_{Aw}=1.5$ significa que el tamaño del generador eólico es 1.5 o lo que es lo mismo que debemos colocar un aerogenerador y medio en paralelo en el sistema. Se podría entender que debemos instalar un aerogenerador cuya energía media producida es igual a 1.5 veces el del generador que tiene una curva normalizada de potencia $P_{W_{norm}}$. Pero elegir un aerogenerador diferente supondría cambiar la curva normalizada de potencia que se ha utilizado en el método y por tanto la validez de todos los resultados.

Una posible solución al problema de interpretación de los resultados del método Langer-Beyer pasa por fijar el valor de C_{Aw} en función del modelo de aerogenerador elegido. Esta premisa es la base del método de dimensionamiento que proponemos.

6.2 Método propuesto de estudio

El objetivo del método es obtener la *LLP* para las distintas configuraciones de $[C_S, C_{A_v}]$ para una carga dada L y un conjunto de aerogeneradores comerciales cuyas curvas de potencia son conocidas.

Supondremos como primer modelo de trabajo:

- Que toda la carga es en corriente continua y que dicha carga la llamaremos L . Si se incorporan cargas de CA haremos las conversiones necesarias para obtener el valor de corriente continua que debe suministrar el sistema a la entrada del regulador. Esta aproximación implica que una carga en corriente alterna es equivalente a una carga en corriente continua a la entrada del regulador y que el valor de la carga en corriente continua se obtiene de suponer una eficiencia constante al regulador.
- Que el SME y SMFV alimentan la misma carga. Es decir, que ambos subsistemas están conectados en paralelo y alimentan tanto la carga como a la batería.

Elegimos una familia de aerogeneradores de baja velocidad con curvas de potencia que denominaremos $[P_{W_1}, P_{W_2}, \dots, P_{W_n}]$. La curva de potencia de un aerogenerador es el resultado de evaluar experimentalmente la relación $[v_{viento}, P_{EL}]$, velocidad de viento/potencia eléctrica de salida.

$$P_{W_n} = (P_{EL_i} | v_i \in [0, 1, \dots, V_{max}]) \quad (6.2)$$

Como hemos visto en [4.35] la curva de potencia de una familia de aerogeneradores se puede expresar de la forma:

$$P_{W_n} = P_{NOM_n} P_{NORM} \quad (6.3)$$

donde:

P_{W_n} es la curva de potencia del aerogenerador “n” de la serie.

P_{NOM_n} es la potencia nominal del aerogenerador “n” de la serie.

P_{NORM} es la curva de potencia normalizada de la serie respecto a P_{NOM_n} .

Dicha curva normalizada es única para la serie de aerogeneradores.

6.2.1 Datos meteorológicos de entrada al sistema

Los datos meteorológicos de entrada serán:

- Series diarias de irradiación media solar sobre plano horizontal
- Series diarias de velocidad media de viento a una altura H.

6.2.2 Preparación de los datos de irradiación para la simulación

Para calcular la irradiación global sobre el plano del array será necesario calcular previamente los valores de $B_d(0)$ y $D_d(0)$ ya que podemos relacionar cada una de sus componentes horizontales con las correspondientes sobre el plano del array.

- Cálculo de $B_d(\beta)$

$$B_d(\beta, \alpha) = G_d(\beta, \alpha) - D_d(\beta, \alpha) \quad (6.4)$$

- Cálculo de $D_d(\beta)$ ¹

$$D_d(0) = K_D G_d(0) \quad (6.5)$$

$$K_D = 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4$$

$$K_T = \frac{G_d(0)}{B_{0d}(0)} \quad (6.6)$$

$$(6.7)$$

En resumen, la radiación difusa se calcula en función de la radiación global y la fracción difusa, K_D . La fracción difusa se calcula utilizando la aproximación polinómica de orden cuatro propuesta por Collares-Pererira y Rabl en función del índice de claridad. El índice de claridad se calcula en función de la irradiación extraterrestre y esta última es función de la unidad astronómica $B_0 = 1.367W/m^2$ y ε_0 que es función del día del año.

¹Suponemos que la radiación difusa es isotrópica

- Cálculo de $G_d(\beta)$

$$G_d(\beta) = G_d(0) \left[(1 - K_D)R_b + (1 + \cos\beta) \frac{K_D}{2} \right]$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) + \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \sin(\phi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\delta \cdot \sin\phi} \quad (6.8)$$

6.2.3 Preparación de los datos de velocidad de viento para la simulación

La variación de la velocidad de viento respecto a la distancia al suelo se comporta bajo la expresión:

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^n \quad (6.9)$$

donde “n” es un coeficiente en función de la rugosidad del terreno.

Tipo de terreno	n
Liso (mar, arena, nieve)	0.10-0.13
Moderado (hierba, trigo)	0.13-0.20
Rugoso (bosques, barrios)	0.20-0.27
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0.27-0.40

Tabla 6.1: Coeficiente “n” en función del tipo de rugosidad

6.3 Método de simulación

El método de simulación parte de la definición de *LLP*:

$$LLP = \frac{\int_t deficitEnergia}{\int_t demandaEnergia} \quad (6.10)$$

La capacidad del generador, C_A , se define como la relación entre los valores medios de la energía producida por el generador y la energía consumida por la carga. En este caso tendremos dos generadores C_{AV} y C_{AW} correspondientes al generador FV y eólico respectivamente. La capacidad del acumulador, C_S , se define como la máxima energía que puede extraerse de él

dividida por el valor medio de la energía consumida por la carga. Es decir:

$$C_{W_A} = \frac{24.P_W[V_{Media}]}{L} = \frac{24.P_{NOM_n}P_{NORM}[V_{Media}]}{L} \quad (6.11)$$

$$C_{V_A} = \frac{\eta_G G_d(\alpha, \beta) A_G}{L} \quad (6.12)$$

$$C_S = \frac{C_U}{L} \quad (6.13)$$

$$C_U = \frac{C_B}{PD_{max}} \quad (6.14)$$

Definimos C'_A en función de el valor medio mensual de irradiación diaria sobre plano horizontal, definir así C'_A nos permite trabajar con valores de $G_d(\alpha, \beta)$ con α y β nulos, ya que en general los datos de irradiación media mensual están disponibles para superficies horizontales.

$$C'_A = \frac{\eta_G A_G G_{dm}(0)}{L} = C_A \frac{G_{dm}(0)}{G_{dm}(\alpha, \beta)} \quad m = 1, 2, \dots, 12 \quad (6.15)$$

La relación de la terna de valores $[C'_{A_v}, C_S, C_{A_w}]$ y su correspondiente LLP se establece mediante una simulación del sistema. Imaginemos un sistema que tiene todo el consumo durante la noche, el acumulador no tiene pérdidas y que la capacidad útil es la nominal.

El estado de carga final del acumulador, en el momento al acabar la noche del día "j" vendrá determinado por el estado de carga del día anterior "j-1" y la energía generada y consumida en el día "j".

$$SOC_j = \underbrace{SOC_{j-1}}_{\text{Bateria.dia.anterior}} + \underbrace{\frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B}}_{\text{Generacion.FV}} + \underbrace{\frac{24.P_W[V_{Media}]}{C_B}}_{\text{Generacion.Eolica}} - \underbrace{\frac{L}{C_B}}_{\text{Consumo.carga}} \quad (6.16)$$

Si suponemos que $C_B = C_U$ la fórmula anterior queda :

$$SOC_j = SOC_{j-1} + \frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B} + \frac{24.P_W[V_{Media}]}{C_B} - \frac{1}{C_S} \quad (6.17)$$

En el caso de que el sumatorio anterior tenga un resultado mayor que 1 significa que la batería está completamente cargada o lo que es lo mismo que

$$SOC_j = 1.$$

La expresión anterior queda del siguiente modo:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{\eta_G A_G G_{dj}}{C_B} + \frac{24.P_W[V_{Media}]}{C_B} - \frac{L}{C_B}, 1\right) \quad (6.18)$$

o bien:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{C'_A G_{dj}}{C_S G_{dm}(0)} + \frac{24.P_W[V_{Media}]}{C_B} - \frac{1}{C_S}; 1\right) \quad (6.19)$$

Si $C_B \neq C_U$ que es la situación más corriente puesto que la ($PD_{max} \neq 1$) la expresión anterior queda:

$$SOC_j = \min\left(SOC_{j-1} + \frac{C'_A G_{dj} PD_{max}}{C_S G_{dm}(0)} + \frac{24.P_W[V_{Media}]}{C_B} - \frac{PD_{max}}{C_S}; 1\right) \quad (6.20)$$

Si el estado de la batería es suficiente para alimentar la carga entonces la energía deficitaria es igual a 0

$$E_{def_j} = 0 \begin{cases} SOC_j \geq \frac{1}{C_S} \\ SOC_j \geq \frac{PD_{max}}{C_S} \end{cases} \quad C_B \neq C_U \quad (6.21)$$

La energía deficitaria se calcula como:

$$E_{def_j} = (1 - SOC_j) LC_S \Leftrightarrow SOC_j < \frac{1}{C_S} \quad (6.22)$$

Y en el caso de $C_B \neq C_U$ tenemos que:

$$E_{def_j} = \frac{(1 - SOC_j) LC_S}{PD_{max}} \Leftrightarrow SOC_j < \frac{PD_{max}}{C_S} \quad (6.23)$$

donde:

E_{def_j} Es la energía deficitaria del día “j”.

Si esta simulación se lleva a cabo para un número de días, N , lo suficientemente largo, como para tener significado estadístico, el valor de la LLP correspondiente a un SHEFV en que hemos excluido el generador auxiliar.

$$LLP = \frac{\sum_{j=1}^N E_{defj}}{NL} \quad (6.24)$$

La probabilidad de pérdida de carga depende, por tanto, de la terna $[C'_{VA}, C_{Aw}, C_S]$ elegida.

Esta ecuación presupone la eficiencia η_G constante a lo largo del período considerado. Debido al largo período de tiempo del programa de simulación el estado inicial del estado de carga del acumulador no afecta a los resultados.

6.3.1 Resumen y pasos del método

Con objeto de ofrecer una solución al dimensionamiento de los SMEFV el método de trabajo se resume en los siguientes pasos:

- **Obtención de los datos de partida**

- Datos geográficos: Latitud y altura de la aeroturbina (H).
- Datos meteorológicos: Series diarias de radiación sobre plano horizontal y velocidades medias de viento a una altura h_o
- Datos de los generadores: Será necesario conocer el A_G y la η_G de generador FV así como la curva normalizada de una serie de aerogeneradores, P_{NORM} , y las potencias nominales para los que existen modelos disponibles, P_{NORM_n}

- **Obtención de los datos intermedios**

- $G_d(\beta)$: Radiación diaria media sobre el plano del array.
- V_{Media} : Velocidad diaria media de viento a la altura del aerogenerador.

- **Valores de C_S y C_{Aw}** Fijada una aeroturbina “j” de $P_{NOM} = P_{NOM_j}$ y un tamaño de batería $C_S = BAT$ aplicaremos el método descrito anteriormente y construiremos el siguiente cuadro.

$PNOM_j$		
$C_S = BAT$		
C'_{Av}	E_{aux}	LLP
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		

Tabla 6.2: Tabla que resume los resultados de la simulación

Parte III

Métodos para la estimación de la demanda energética

Capítulo 7

Electrificación doméstica

7.1 Introducción

Para calcular la energía que la aplicación necesita consumir será necesario calcular la aportación del consumo total de los equipos de corriente continua y alterna.

El cálculo de la energía que necesitamos consumir es uno de los apartados donde se hace necesaria una reflexión profunda de los hábitos y costumbres del usuario final. En este sentido la Permacultura no sólo nos aporta soluciones técnicas que disminuyen el consumo eléctrico necesario sino que introduce la necesidad de plantearnos cómo deben integrarse los hábitos humanos en un sistema de estas características.

La Permacultura no solo trata de las medidas que se deben tomar para favorecer el ahorro de energía sino que promueve un estilo de vida donde las pautas de comportamiento del ser humano están orientadas hacia el desarrollo sostenible.

La introducción de sistemas de ahorro energético no es la solución a la contaminación si no nos planteamos soluciones globales que rompan la dinámica del crecimiento económico como condición única y necesaria para que las sociedades se “desarrollen”.

Por esta razón debe entenderse que es imposible encontrar modelos cuantitativos que sean capaces de estimar la energía eléctrica necesaria en una vivienda si no se conocen los hábitos del usuario final y el tipo de vivienda donde irá instalado el sistema.

En el Apéndice titulado “Estructuras y sistemas en Permacultura” se introducen algunas de las soluciones técnicas para distintos tipos de vivienda y su emplazamiento.

7.2 Evaluación del consumo de energía eléctrica

7.2.1 Evaluación del consumo mensual de CC

La energía que la aplicación considerada necesita consumir cada mes va a depender exclusivamente del tipo de equipos con los que componen la carga así como del tiempo que se vayan a utilizar.

Será necesario conocer la potencia de los equipos, P_{NOM} y el número de horas de funcionamiento al mes.

La tabla [7.1] muestra la potencia nominal de los equipos más típicos y las horas de utilización más frecuentes de consumo en viviendas fotovoltaicas.

Equipos	P_{NOM}	$I_A(12V)$	$I_A(24V)$	Horas
Luz Cocina	22	1.83	0.92	3
Luz C.estar	22	1.83	0.92	4
Luz C.baño	8	0.66	0.33	1
Luz Dormit.	15	1.25	0.63	0.5
Luz Pasillos	8	0.66	0.33	4
TV (B/N)	25	2.1	1.05	4
Radio	6	0.5	0.25	1
Frigorífico	70	5.8	2.9	14

Tabla 7.1: Consumos en CC y uso más frecuente

7.2.2 Evaluación del consumo mensual de CA

Para evaluar el consumo de la energía consumida se usa el mismo patrón que para corriente continua si bien se introduce un factor de corrección debido

a la necesidad de convertir de CC a AC. Este factor de corrección al que llamaremos F_C viene dado por la ecuación:

$$F_C = \frac{V_{AC}}{V_{CC}\eta_{70}} \quad (7.1)$$

donde:

F_C Es el factor de corrección.

V_{AC} Es la tensión en corriente alterna.

V_{CC} Es la tensión nominal de la instalación.

η_{70} Es el rendimiento del inversor al 70 de la carga.

7.3 Energía eléctrica para equipos de comunicación por radio

El protocolo de comunicaciones AX.25 permite utilizar las tradicionales aplicaciones basadas en TCP/IP como el correo electrónico a través de radio. Un sistema de comunicaciones basado en AX.25 es capaz de dar soporte de comunicaciones a localidades aisladas de la red eléctrica y telefónica proporcionando velocidades entre 1200 y 9600 baudios en VHF y UHF respectivamente. Un equipo de comunicaciones "Packet Radio" está compuesto por un ordenador con salida RS-232, una TNC (Terminal Node Controller) o modem de radio, una emisora de VHF y/o UHF y una antena.[EHAS 98]

El consumo mínimo de un equipo de estas características ronda los 150W. En el capítulo 11 se encuentran los consumos típicos de cada uno de los elementos del nodo de comunicaciones.

Capítulo 8

Potencia eléctrica para bombeo de agua

8.1 Introducción a las bombas

En el curso de estos últimos 15 años, han aparecido una infinidad de diferentes soluciones de bombas. Algunas de estas soluciones prácticamente han desaparecido debido a problemas técnicos (por ejemplo, las bombas de ariete con motor en superficie, a consecuencia del desgaste del ariete). Otras soluciones técnicas han alcanzado, por el momento, sólo resultados de laboratorio, pero con escasa experiencia de campo. De tal forma que, a efectos prácticos, podemos considerar que el mercado actual ofrece, esencialmente, dos tipologías de bombas cuyas características resume la tabla siguiente.

	Sistemas DC	Sistemas AC
Constitución	Gen. y bomba	Gen, inversor y bomba
Generador (W_p)	160 - 600	600 - 2.000
Voltaje DC (V)	≤ 60	≥ 120
Motobomba	Flotante	Sumergida
Rango (m^4/dia)	100 - 200	500 - 1.500
Fiabilidad	Media	Muy elevada
Periodo de mantenimiento	6 - 12 meses	5 -7 años
Fuente de agua	Ríos y pozos	Sondeos

Tabla 8.1: Tipos de bombas

Los sistemas DC son, en general, de pequeño tamaño y están constitui-

dos por un generador fotovoltaico que ataca directamente a un motor DC acoplado a una bomba o un generador eólico que a través de un rectificador de doble ataca al motor de DC directamente o alimentando a un batería.

En los sistemas donde la generación ataca directamente a la bomba variaciones de irradiación o velocidad implican variaciones de la la tensión del punto de trabajo que resulta del cruce de las características del generador y de la motobomba y, con ello, varía la velocidad de giro del motor y el caudal de agua que proporciona la bomba.

Los sistemas AC están constituidos por un generador eólico o fotovoltaico que actúa sobre una motobomba sumergida AC, a través de un inversor de frecuencia y tensión variable. Al variar la irradiancia sobre el generador varía la frecuencia y la tensión a su salida y, con ello, la velocidad de giro del motor y el caudal bombeado.

8.2 Bombas de agua

En aplicaciones de baja potencia ($\leq 200W$) se utiliza una gran diversidad de bombas: centrífugas, de diafragma, de pistón, etcétera. Para aplicaciones de mayor potencia, la oferta del mercado se reduce a una única solución: la bomba centrífuga multietapa. Tecnológicamente muy desarrollada, esta solución conlleva bombas muy fiables y que pueden emplearse en un amplio abanico de alturas y caudales. No obstante, plantean problemas de eficiencia en condiciones de mucha altura o bajo caudal, que tienen un indudable interés de mercado. Por ello, no sería extraño que en un futuro próximo asistiéramos a la irrupción de nuevos tipos de bombas específicamente destinados a cubrir dicho sector de aplicación.

Hoy en día el mercado ofrece una diversidad tal de materiales en los diseños de las bombas, que se hace posible la adaptación de bombas fiables y duraderas a cada circunstancia y tipo de agua a extraer, por lo que los filtros no son necesarios para asegurar el buen funcionamiento de éstas. Hace algunos años, las tuberías de acero (o para sistemas muy pequeños, de PVC) eran las normalmente utilizadas en las conducciones de agua. El acero galvanizado es caro y extremadamente pesado, por lo que eran necesarios trípodes para montar las bombas. Los cambios de la motobomba eran costosos y exigían mucho tiempo. Hoy en día, se pueden encontrar en el mercado tuberías flexibles de diferentes suministradores hechas de material multicapa.

Estos tubos son flexibles, livianos, fiables y menos costosos que los de acero galvanizado. Los cambios de la motobomba exigen sólo una parte mínima del tiempo requerido antes: para cambiar una motobomba instalada a una profundidad de 30 metros, se requieren actualmente menos de dos horas.

8.3 Diseño del sistema

El método de diseño técnico que se propone también se basa, como en el caso de instalaciones de electrificación, en calcular el sistema para el "mes peor", es decir, aquél para el cual la relación entre la demanda de bombeo de agua y la energía eólica disponible es mayor.

La potencia eléctrica que necesita el motor viene determinada por su eficiencia en convertir la potencia eléctrica en potencia hidráulica para el caudal de agua que se quiere extraer, Q_D , y por la altura a la que se quiere elevar, H_T .

8.3.1 Caudal requerido de agua

Hay que cuantificar las necesidades de agua, las cuales dependen obviamente del uso final de las mismas: consumo humano, ganado o irrigación de terrenos. En este sentido es importante destacar el uso técnicas en agricultura que minimicen el consumo de agua.

Existen dos formas para minimizar el consumo de agua: por un lado se deben utilizar todas las técnicas de riego localizado y por otro evitar la evapotranspiración a través de técnicas como el *mulch* o el cultivo en bancales. Estos y otros aspectos del ahorro de agua se recogen en el apéndice dedicado a "*Permacultura*".

El agua utilizada con fines de irrigación se caracteriza por grandes variaciones entre los distintos meses, y es asimismo dependiente de la naturaleza de los cultivos, el régimen de lluvias y la eficiencia del sistema de riego.

Dimensionar el consumo de agua pasa por el profundo conocimiento climatológico de la zona y por las técnicas agrícolas apropiadas para cada clima.

8.3.2 Altura Total

Durante el proceso de bombeo, el nivel de agua en el interior del pozo tiende a bajar, hasta que la velocidad con la cual se filtra agua a través de las paredes del mismo llega a equilibrar aquella a la cual se bombea el agua al exterior. Consecuentemente, cuan mayor sea la tasa de extracción, mayor será la caída del nivel del agua en el interior del pozo. En realidad, el descenso de dicho nivel depende de un cierto número de factores, como el tipo y permeabilidad del suelo, y el espesor del acuífero.

Un manto acuífero del tipo de capa freática es el que no está confinado por una capa superior impermeable. Por lo tanto, también se llama manto acuífero no cautivo. El agua de estas capas está virtualmente a la presión atmosférica y el manto superior de la zona de saturación se llama capa freática. La capa freática marca el nivel más alto al cual se llevará el agua en un pozo construido en un manto acuífero del tipo de capa freática. La propiedad de una capa acuífera relacionada con su función se conoce como permeabilidad. La permeabilidad es una medida de la capacidad de una capa acuífera para conducir agua. Es proporcional a la diferencia de presión y velocidad del flujo entre dos puntos que están en condiciones laminares o no turbulentas, y se expresa mediante la siguiente ecuación conocida como Ley de Darcy.

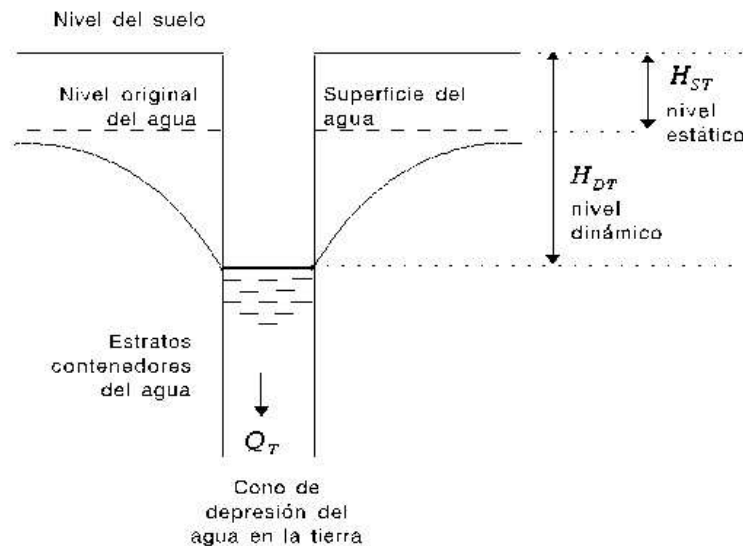


Figura 8.1: Perfiles de difusión del agua alrededor del pozo

Es necesario efectuar una prueba de bombeo para determinar el descenso de nivel del agua en el pozo. Ésta suele consistir en la extracción de agua con una bomba portátil, a un determinado caudal, acompañada de la medición del descenso que experimenta el nivel del agua una vez que éste se ha estabilizado. Por lo tanto, tres son los datos que caracterizan a un pozo después de la prueba de bombeo: el nivel estático, $H_{ST}[m]$, el nivel dinámico, $H_{DT}[m]$, y el caudal de prueba, $Q_T[\frac{m^3}{h}]$.

El sistema debe ser capaz de bombear agua desde el nivel dinámico del pozo hasta la salida de la bomba en el punto de almacenamiento o sistema de distribución, altura que recibe el nombre de altura vertical H_V . Pero, además, debe vencer las pérdidas de fricción en la tubería, debidas a la resistencia al flujo del agua causada por la viscosidad del agua, turbulencias en las tuberías, etcétera. Estas pérdidas se modelan haciéndolas equivalentes a una altura adicional que el agua bombeada debe vencer, denominada altura de fricción H_F , y que está relacionada con el cuadrado del caudal de extracción. Por tanto, la potencia P_{EL} que se ha de suministrar a la bomba es tal que le permita bombear agua, a un caudal Q_D determinado, a una altura neta de trabajo o altura total H_T igual a $H_V + H_F$.

8.3.3 Altura Total Equivalente

Potencia, caudal y por tanto altura total no son constantes, sino que varían con el tiempo; ello hace que el cálculo exacto del volumen de agua bombeado a partir de estas variables sea complejo. Es por ello por lo que se define una altura total equivalente, H_{TE} , como una hipotética altura constante que conllevaría el mismo volumen diario de agua bombeada. De esta forma, el cálculo se independiza del pozo en cuestión y de las características de las tuberías, interviniendo sólo las condiciones climatológicas y las características de la bomba.

La altura total equivalente se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H_{TE} = H_{ST} + H_{CI} + \left(\frac{H_{DT} - H_{ST}}{Q_T} \right) Q_{AP} + H_F(Q_{AP}) \quad (8.1)$$

En la cual H_{ST} , H_{DT} y Q_T han sido definidos previamente, H_{CI} altura del depósito, Q_{AP} tiene el significado de un caudal medio cuyo cálculo mostraremos en el apartado siguiente. El factor 0.9 es una forma simplificada de tener en cuenta las pérdidas por fricción en las tuberías (contribución equivalente en altura). Dichas pérdidas son función del caudal medio Q_{AP} . En

el caso de tuberías de plástico se pueden calcular dichas pérdidas una vez conocidos el diámetro interno y la longitud de las tuberías.

Además de las tuberías, un sistema de transporte y distribución del agua consta de otros accesorios (válvulas, codos, etcétera) que producen nuevas pérdidas en la presión total del líquido. Por simplicidad, se ignoran estas pérdidas, suponiéndolas despreciables frente a las pérdidas totales, sin que por ello se cometa un error importante.

8.3.4 Caudal máximo de extracción

Existe un peligro asociado a la utilización de grandes bombas en pequeños pozos, derivado de la posibilidad de provocar una disminución del nivel del agua hasta el que corresponde a la entrada de la misma en la bomba, momento en el cual la bomba comienza a extraer una mezcla de aire y agua del pozo, se dice entonces que la bomba "cavita". Consecuentemente, existe un máximo caudal extraíble para cada pozo, $Q_{MAX}[\frac{m^3}{h}]$. La información de las pruebas realizadas a los pozos, suele estar referida al máximo caudal extraíble del pozo ($Q_T = Q_{MAX}$).

La compatibilidad entre el pozo y la bomba está asegurada si la toma de agua de la bomba se coloca por debajo del nivel dinámico del pozo H_{DT} , y el caudal extraído por la bomba, a una potencia DC de 0,8 veces la P_{NOM} y a una altura $H_T = H_{DT}$, es menor que Q_{MAX} . Esta última condición refleja el hecho de que la potencia nominal del generador está referida a condiciones estándares, que son diferentes de las condiciones reales de operación.

8.3.5 Pérdidas de altura en función del flujo de extracción para distintos diámetros de tubería.

Altura manométrica por cada 100 metros de tubería recta.

En estas tablas se representan las pérdidas en tuberías de distintos materiales. Las pérdidas se expresan en función de altura manométrica por cada 100 metros de tubería. Será necesario multiplicar por el coeficiente M para los distintos materiales.

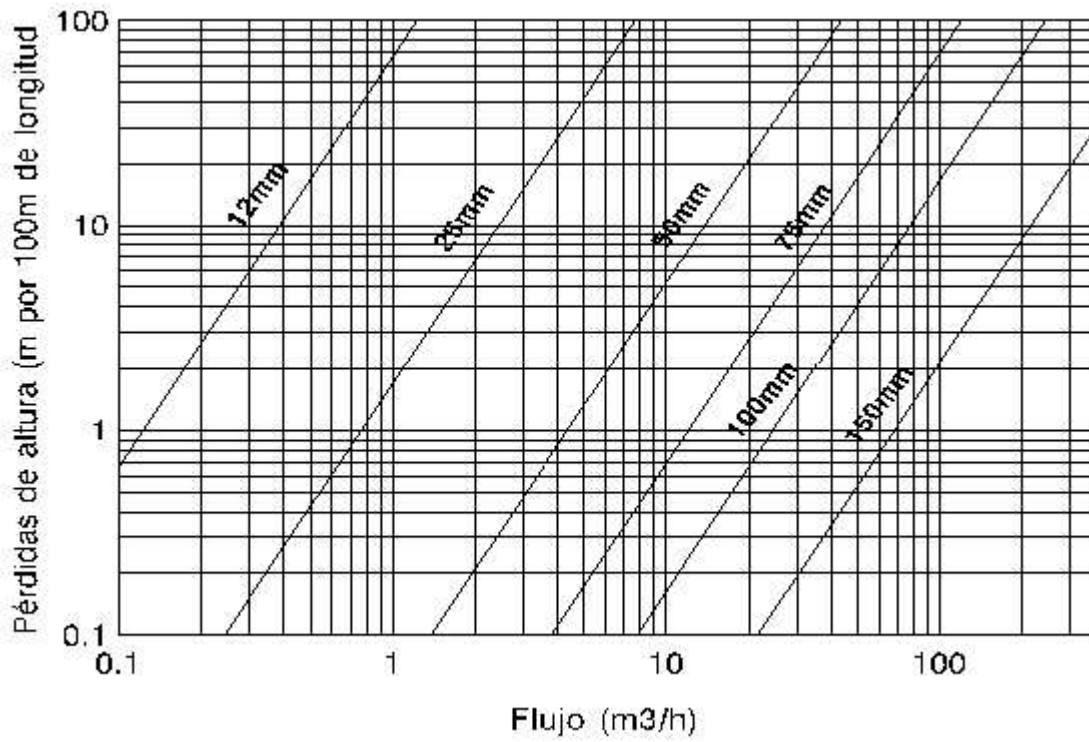


Figura 8.2: Altura equivalente de fricción por cada 100 metros de tubería

Perdida de carga en tuberías de hierro							
Caudal litros/hora	19	26	32	38	50	63	75
500	2,30						
1000	9,30	2,3	0,45				
2000	44,80	10,60	32,85	1,10			
3000		19,8	5,00	2,00	1,00	0,35	
4000		32,50	9,10	4,00	1,65	0,75	0,28

Tabla 8.2: Altura manométrica por cada 100 metros de tubería de hierro recta

Materiales	M
Acero sin soldadura	0.75
Hierro	1
Fibrocemento	0.60
P.V.C.	0.50

Tabla 8.3: Coeficientes de corrección para distintos materiales

8.3.6 Cálculo del caudal medio

El caudal medio $Q_{AP_{mensual}}$ se calcula suponiendo que la bomba trabaja a P_{NOM} cuando esta en funcionamiento. Si $Q_{AP_{nom}}$ es el caudal de la bomba a potencia nominal y una altura manométrica H_{TE} :

$$Q_{AP_{mensual}} = Q_{AP_{nom}} \cdot T(h) \quad (8.2)$$

donde $T(h)$ es el número de horas que esta la bomba en funcionamiento. Debido a que la bomba siempre trabaja a potencia nominal la componente de fricción de la altura equivalente se calculará teniendo en cuenta que el caudal que extrae la bomba durante su funcionamiento es el caudal nominal a la altura manométrica de bombeo.

Parte IV

Aplicación práctica en una vivienda de clima continental

Capítulo 9

Cálculo de la oferta energética del SFV

Para poder aplicar el método *L.L.P.* (probabilidad de pérdida de carga) es necesario disponer de una larga serie de valores de irradiación diaria. Para el caso de Valladolid no se dispone de una serie lo suficientemente larga de datos históricos que nos permitan hacer uso del método.

Nos encontramos, por tanto, con la dificultad de obtener una serie de valores a partir de la información histórica conocida. Algunos autores han investigado en este tema y existen métodos para obtener series de valores a partir de los valores medios mensuales de la propia radiación. La característica principal de estas series es que conservan propiedades estadísticas cuya validez se presupone universal, dado que dichos valores estadísticos se cumplen en las series históricas disponibles.

La persistencia de la radiación se describe a partir de una autorregresión de primer orden, y la función de distribución del índice de claridad de la atmósfera tiene una forma exclusivamente asociada a su valor medio durante el periodo considerado.

Un modelo que conduce a buenos resultados fue propuesto por Markov. Este modelo produce secuencias de valores de K_T , utilizando una librería de matrices de transición asociadas, cada una de ellas, a un intervalo específico de K_{T_m} . Analizando secuencias históricas de datos procedentes de diferentes estaciones de medida, los autores proponen una librería de validez supuestamente universal. A cada matriz se asocia, además, un intervalo de valores de K_t definido por sus valores máximo y mínimo $K_{T_{max}}$ y $K_{T_{min}}$. [Valverde 92]

El método de generación de secuencias de irradiación precisa como datos de entrada los doce valores de $G_{dm(0)}$.

9.1 Cálculo de los valores de irradiación media diaria mensual

Los datos disponibles para Valladolid proceden de la Estación Meteorológica de Villanubla.

Para obtener los doce valores de $G_{dm(0)}$ se cuentan con las siguientes fuentes de datos.

- Serie de 929 valores dispersos entre 1973 y 1982 procedentes del I.N.M. Dichos valores están bajo soporte informático en formato RGD. Valores de irradiación media diaria sobre superficie horizontal para cada uno de los días medidos en $\frac{Wh}{m^2 dia}$
- Doce valores de irradiación media diaria para cada uno de los meses procedentes de los manuales de energías renovables de Censolar. Valores de irradiación media diaria sobre superficie horizontal para cada mes medidos en $\frac{MJ}{m^2 dia}$
- Doce valores de irradiación media diaria para cada uno de los meses procedentes de los manuales de energías renovables del I.D.A.E. Valores de irradiación media mensual sobre una superficie a 60 grados medidos en $\frac{KWh}{m^2 diames}(60)$.

9.1.1 Tratamiento de los datos y validación de los 12 valores mensuales

Valores procedentes de CENSOLAR

Con objeto de comparar todas las fuentes intentaremos obtener doce valores de $G_{dm(0)}$ en $\frac{KWh}{m^2 diames}$ para cada una de las fuentes, es decir los doce valores de irradiación media diaria para cada mes del año en $\frac{KWh}{m^2 diames}$ de superficie horizontal.

Como los valores propuestos por Censolar para $G_{dm(0)}$ vienen expresados en $\frac{MJ}{m^2 diames}$ y queremos obtener esos mismos valores en $\frac{KWh}{m^2 diames}$ es necesario

$G_{dm}(0)$ CENSOLAR		
Meses	$\frac{MJ}{m^2}$	$\frac{Wh}{m^2}$
Enero	5.5	1528
Febrero	8.8	2444
Marzo	13.9	3861
Abril	17.2	4778
Mayo	19.9	5528
Junio	22.6	6278
Julio	25.1	6972
Agosto	23	6389
Septiembre	18.3	5083
Octubre	11.2	3111
Noviembre	6.9	1917
Diciembre	4.2	1167

Tabla 9.1: Irradiación media. Valores CENSOLAR (Valladolid)

realizar una simple conversión de unidades.

Tendremos por tanto doce valores de energía media diaria para cada uno de los meses del año. No debemos confundir el valor de la energía media diaria en cada uno de los meses con la energía media de cada mes. Está distinción es especialmente importante como veremos más adelante.

Valores procedentes de las tablas de INM

El número de valores históricos recogidos en tablas no llegan a 1000. La tabla de valores necesita una revisión previa pues existen valores que claramente no entran en el orden de magnitud a medir (valores negativos o muy por encima de los esperados). Se los valores medios de $G_{dm}(0)$ obtenidos coinciden con los valores medios propuestos por el Censolar.

El resultado del análisis de datos a partir de la serie RGD_8140.DAT es el siguiente:

La similitud entre los valores medios mensuales obtenidos a partir de la serie de Villanubla y los propuestos por Censolar nos hacen suponer que se ha utilizado esta misma serie histórica (probablemente la única que exista) y que se han tratado de igual forma los datos.

$G_{dm}(0)$ INM		
Meses	Núm.Datos	$\frac{Wh}{m^2}$
Enero	89	1910
Febrero	78	2375
Marzo	72	3724
Abril	54	4324
Mayo	49	5328
Junio	61	5993
Julio	92	6434
Agosto	77	5799
Septiembre	59	4450
Octubre	94	2910
Noviembre	100	2078
Diciembre	104	1159
Total Valores	929	

Tabla 9.2: Irradiación media. Valores INM (Valladolid)

Valores procedentes del IDAE

El I.D.A.E. propone en sus manuales de energías renovables doce valores de irradiación media mensual en $\frac{KWh}{m^2mes}$ de una superficie a 60 grados sobre la horizontal.

En primer lugar convertiremos los valores medios mensuales en valores medios diarios en cada mes dividiendo por el número de días de cada mes. Habremos, por tanto, realizado la conversión de energía mensual a energía media diaria mensual. El problema de conversión reside en convertir los valores sobre una superficie a 60 grados a superficie horizontal.

El cálculo de la irradiación diaria sobre superficies inclinadas $G_{dm}(\beta)$, se puede abordar a partir del valor de $G_{dm}(0)$. Para ello primero se obtienen las radiaciones horarias, directas y difusa sobre la superficie horizontal, se calcula después y a partir de ellas los correspondientes valores sobre una superficie inclinada y finalmente se integran tales valores a lo largo del día. Los límites de la integración son las horas del salida y sol sobre una superficie inclinada.

El desarrollo de este método de cálculo se abarca profundamente en di-

ferentes textos y para el caso de superficies horizontales se ha propuesto relaciones funcionales entre $G_{dm}(0)$ y $G_{dm}(\beta)$, sabiendo incluso que se pierde exactitud. Una primera aproximación para superficies con $\alpha = 0$ (orientadas al sur) es suponer la isotropía de la radiación difusa y se podrá escribir:

$$G_{dm}(0, \beta) = (G_{dm}(0) - D_{dm}(0))R_b + \frac{(1 + \cos\beta)D_{dm}(0)}{2} + \frac{1 + \cos\beta}{2}\rho G_{dm}(0) \quad (9.1)$$

Los tres sumandos de esta ecuación corresponden respectivamente, a las componentes directa, difusa y de albedo. El factor R_b representa la relación entre las irradiancias directas diarias incidentes sobre una superficie inclinada y una superficie horizontal. Para su cálculo se supone que esa relación es la misma entre las irradiancias extraterrestres diarias sobre las mismas superficies.

Otra manera de poder calcular la $G_{dm}(\beta)$ a partir de $G_{dm}(0)$ consiste en suponer una relación constante entre ambos valores durante un mes y calcular dicha relación para cada mes y latitud.

Dicha relación viene dada para cada latitud y año:

$$K_{lat,mes} = \frac{G_{dm}(60)}{G_{dm}(0)} \quad (9.2)$$

El valor de $K_{41,8,mes}$ se obtiene de las tablas propuestas por Censolar donde se encuentran valores de $K_{lat,mes}$ para latitudes de 41 y 42 para cada uno de los meses.

El valor de $K_{41,8}$ se obtiene como interpolación lineal entre K_{42} y K_{41}

$$K_{41,8} = K_{41} + (K_{42} - K_{41}).0,8 \quad (9.3)$$

Todos los valores de las tres fuentes en $\frac{Wh}{m^2\text{día}}(mes)$

Observando el gráfico vemos que exceptuando el valor para el mes de febrero ofrecido por el IDAE las tres fuentes ofrecen datos similares. Podemos afirmar que es muy probable que la serie procedente del INM ha sido, sin duda, la generadora de los valores de G_{dm} tanto para Censolar como para el IDAE

$G_{dm}(0)$ IDAE					
Meses	$\frac{KWh}{m^2mes}(60)$	Dias	$\frac{KWh}{m^2dia}(60)$	$K_{41.8}$	$\frac{KWh}{m^2mes}(0)$
Enero	60,2	31	1,942	1,426	1,362
Febrero	125,4	28	4,479	1,276	3,510
Marzo	131,1	31	4,229	1,096	3,859
Abril	131,6	30	4,387	0,918	4,779
Mayo	132,1	31	4,261	0,788	5,408
Junio	137,9	30	4,597	0,746	6,162
Julio	160,3	31	5,171	0,796	6,496
Agosto	172,1	31	5,552	0,928	5,982
Septiembre	146,6	30	4,887	1,148	4,257
Octubre	131,7	31	4,248	1,406	3,022
Noviembre	84,2	30	2,807	1,584	1,772
Diciembre	62,4	31	2,013	1,564	1,287

Tabla 9.3: Irradiación media. Valores IDAE. (Valladolid)

$G_{dm}(0)$ Comparativa			
Meses	IDAE	Censolar	INM
Enero	1362	1528	1910
Febrero	3510	2444	2375
Marzo	3859	3861	3724
Abril	4779	4778	4324
Mayo	5408	5528	5328
Junio	6162	6278	5993
Julio	6496	6972	6434
Agosto	5982	6389	5799
Septiembre	4257	5083	4450
Octubre	3022	3111	2910
Noviembre	1772	1917	2078
Diciembre	1287	1167	1159

Tabla 9.4: Tabla comparativa de las tres fuentes de datos

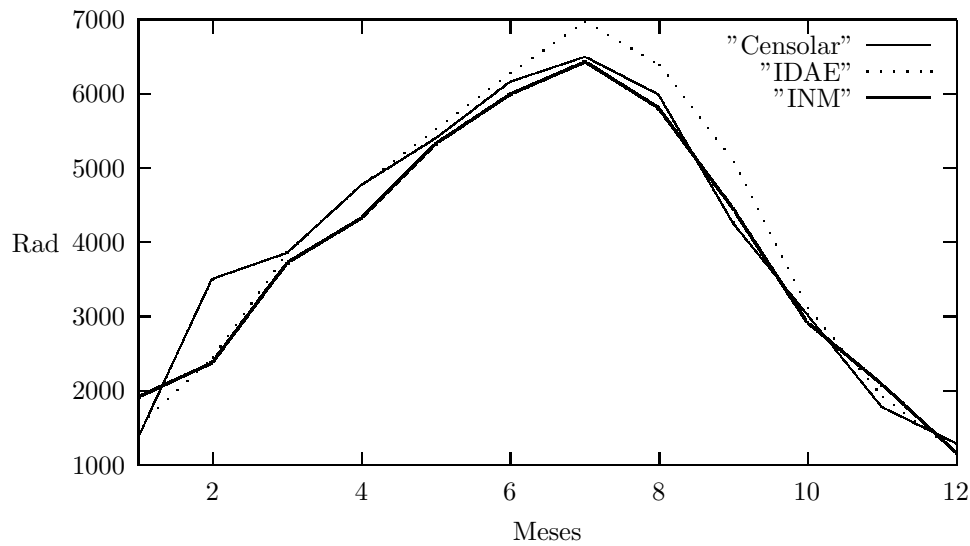


Figura 9.1: Comparativa entre las tres fuentes de datos

9.2 Generación de series sintéticas de radiación a partir de matrices de Markov

Hemos generado una serie de 23 años (8400 valores) haciendo uso de la librería `n15_m25.lie`. Serie generada que denominaremos de este momento en adelante como `S8400VaG.RGD`. Para generar una serie de 23 años, el programa de necesita introducir un año tipo (serie generadora) `SGVa.RGD`. El año tipo que introducimos los 12 valores de $G_{dm}(0)$ obtenidos en el estudio anterior.

9.2.1 Comprobación de la validez de la serie generada

Una vez obtenidos los 8400 valores hallamos sus correspondientes $G_{dm}(0)$ con objeto de verificar si los valores medios de `S8400VaG.RGD` nos conducen a valores de $G_{dm}(0)$ similares a los de la serie generadora `SGVa.RGD`.

El coeficiente de correlación entre los valores $G_{dm}(0)$ de la serie generadora y la generadora es de 0,999473 lo que nos indica que al menos esta propiedad estadística se conserva.

El valor de $LLP=f(C'_A, C_S)$, se obtiene de introducir los 8400 valores de

Meses	Número Datos	Datos entrada	Datos salida
Enero	713	1528	1569
Febrero	649	2444	2440
Marzo	713	3861	3914
Abril	690	4778	4835
Mayo	713	5528	5551
Junio	690	6278	6266
Julio	713	6972	6843
Agosto	713	6389	6447
Septiembre	690	5083	5104
Octubre	713	3111	2986
Noviembre	690	1917	1970
Diciembre	713	1167	1247
Total Valores	8400		
Coef. Correlación	0,999473		

Tabla 9.5: Comparación de los valores medios de irradiación de la serie generado respecto a los datos medios de entrada

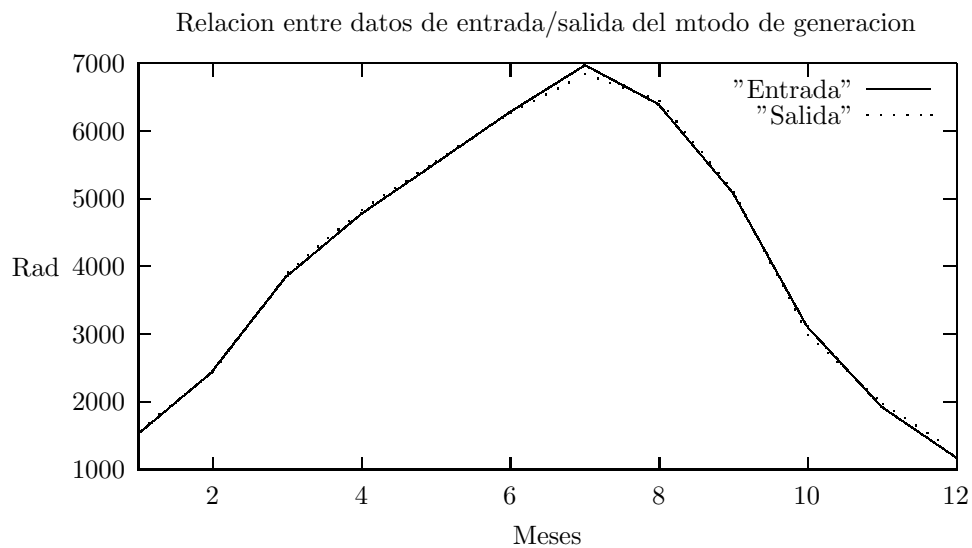


Figura 9.2: Relación entre los datos de entrada y los de salida de la generación

C_S	LLP 0.01	LLP 0.025	LLP 0.05	LLP 0.075	LLP 0.10	LLP 0.2
1	0,67929	0,4703	0,33868	0,27627	0,24123	0,17594
2	0,594133697	0,433965794	0,322966112	0,267932374	0,237559572	0,175712097
3	0,549359084	0,414027238	0,314114265	0,263172313	0,235438453	0,175578919
4	0,519652653	0,400438679	0,307981308	0,259846371	0,23394499	0,175484489
5	0,497721335	0,390206463	0,3033068	0,257295543	0,232793098	0,175411278
6	0,480491018	0,382040525	0,299540165	0,255229965	0,231856145	0,175351484
7	0,46638919	0,375269792	0,296392037	0,253496486	0,231066905	0,175300944
8	0,454508607	0,369501785	0,293691761	0,252004398	0,230385407	0,175257176
9	0,44428065	0,364487675	0,291330376	0,250695574	0,229785951	0,175218579
10	0,435326616	0,360060084	0,289234138	0,249530552	0,229251041	0,17518406
f	0,67929	0,4703	0,33868	0,27627	0,24123	0,17594
u	0,19324	0,116	0,06854	0,04421	0,02212	0,00187
r	0,99572	0,99732	0,99334	0,99681	0,99617	0,96202

Tabla 9.6: Resultados finales de la simulación

la serie sintética S8400VaG.RGD en el método numérico descrito en [3.1.1]. Este método conduce a una expresión analítica de la forma:

$$C'_A = fC_S^{-u} \quad (9.4)$$

El resultado de la aplicación del método numérico nos conduce a las distintas expresiones analíticas para diferentes valores de LLP .

9.2.2 Resultado de la simulación

Es importante volver a hacer notar que para valores altos de LLP o para grandes C_S el tamaño del generador C'_A tiende asintóticamente a un valor. Este valor indica el tamaño del generador FV que alimenta el 99% del consumo de la carga más las pérdidas en el almacenamiento.[Hass 94]

Una representación de $[C'_A, C_S, LLP]$ ilustra como a altas LLP el tamaño del generador FV es prácticamente constante independientemente del tamaño del acumulador.

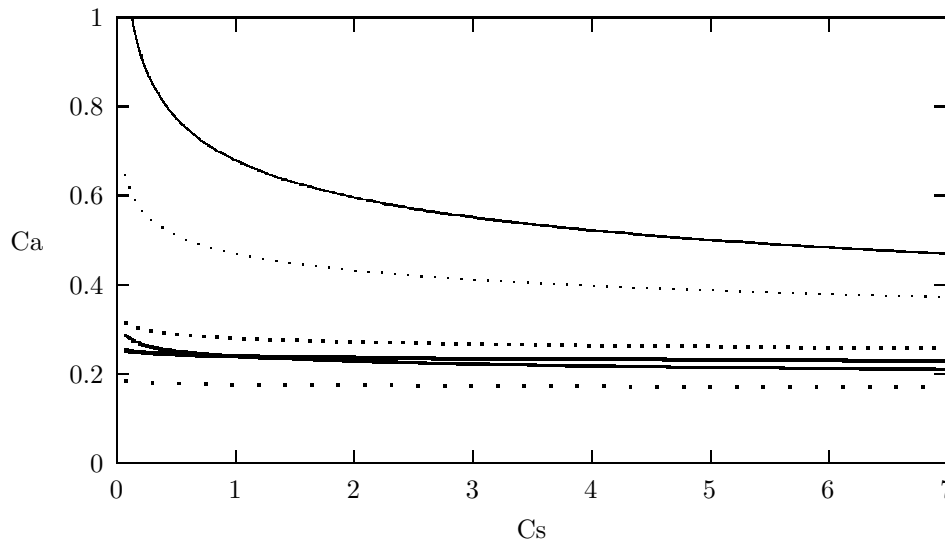


Figura 9.3: Cs-Cs para distintas LLP

9.2.3 Inconvenientes del método. Trampa Estadística

El método utilizado parte de un conjunto de valores medios de radiación mensual que se utilizan para generar una serie de valores de radiación diaria. Los datos de origen son los doce valores medios mensuales que se obtienen a partir de datos geográficos de la zona. Si bien el método de *LLP* a partir de series de Markov ofrece buenos resultados debemos ser cautos al interpretar las curvas de *LLP* y su posible utilidad. El problema de la simulación está en los doce valores medios mensuales con los que generamos la serie diaria de Markov, los doce valores medios mensuales se obtienen a partir de escasos valores geográficos. Aunque en una instalación de este tipo bastaría con un $LLP=0.01$, el escaso número de datos geográficos de origen no nos permite afirmar que la instalación se adecue a las necesidades de consumo de la zona.

El método de *LLP* es más riguroso en tanto en cuanto se tienen más datos para realizar la simulación. Aunque el método de Markov nos permite generar tantos datos como sean necesarios a partir de doce valores medios de radiación mensual, los valores medios de radiación mensual se obtienen a partir de datos geográficos, la búsqueda de *LLP* más bajas nos obliga a trabajar con un mayor número de valores de radiación diaria en la simulación.

El método de Markov nos permite generar una serie diaria tan grande

como queramos a partir de datos de radiación media mensual. El que podamos generar series de datos de radiación diaria de cualquier tamaño no implica que las curvas de *LLP* obtenidas a partir de la simulación de estos datos tengan algo que ver con la realidad.

En resumen, la trampa estadística consiste en obtener series de datos a partir de escasos datos geográficos de origen y creer que la serie generada puede ser utilizada para un *LLP* tan bajo como deseemos. Para bajos valores de *LLP* debemos tener un conjunto lo suficientemente alto de valores geográficos para realizar la simulación ya sea a partir de los propios datos o a partir de la serie de Markov generada a partir de sus valores medios mensuales.

En nuestro caso concreto el escaso número de datos de origen no nos permite trabajar con $LLP < 0.01$ e incluso para el caso de $LLP = 0.01$ el escaso número de valores de origen no nos conduce a resultados muy optimistas. Una solución para aumentar esta fiabilidad es incorporar una energía "suplementaria" que aumente la incertidumbre de un método cuyos resultados se desprenden de escasos datos históricos.

Capítulo 10

Cálculo de la oferta energética del SME

La ausencia de series temporales de datos nos obliga a utilizar el modelo estático descrito en [4.4.3] que parte de la expresión de la función de Weibull para una distribución de velocidades de viento.

10.1 Fuente de datos del potencial eólico.

El Mapa Eólico Nacional es consecuencia del Convenio de colaboración suscrito por la D.G. de innovación Industrial y Tecnológica, Centro de estudios de la Energía, ASINEL y el I.N.M.

Las tablas siguientes muestran los siguientes valores mensuales donde los parámetros de la función de Weibull están en nudos y en (m/s) para la estación:

FINCA: Base Aérea de Villanubla

PARAJE: Montes Torozos

MUNICIPIO: Villanubla.

COMARCA: Centro (según MA)

PROVINCIA: Valladolid.

SITUAC. GEOGRÁFICA: M.T.N. 1:100.000 Hoja 8-7,

Coordenadas Geográficas 41 43'N 4 51'W,

Coordenadas U.T.M. X 346.904 Y 4.618.267 Z 843

Meses	%	V	FPE	W	$\langle A \rangle \cdot 10^4$	$\langle C \rangle$	$\langle AA \rangle$	$\langle V \rangle$	$\langle P \rangle \frac{W}{m^2}$
Enero	17,6	4,01	4,4	176	1100,2564	1,06	4,12	4,01	209
Febrero	19	4,84	3,58	247	600,3195	1,22	5,14	4,84	267
Marzo	19,2	5,51	2,97	261	407,683	1,33	5,66	5,25	291
Abril	19	5,20	2,67	229	310,9388	1,44	5,66	5,20	248
Mayo	18,8	4,42	2,97	156	499,8418	1,34	4,63	4,42	171
Junio	19,3	4,01	2,87	114	516,6276	1,3	4,63	4,01	123
Julio	18,7	3,86	3,11	109	613,795	1,33	4,12	3,86	115
Agosto	18,7	3,81	3,14	106	623,5327	1,33	4,12	3,81	111
Septiembre	18,3	3,50	3,66	97	927,2277	1,2	3,60	3,50	106
Octubre	17,9	3,96	3,99	153	877,3929	1,16	4,12	3,96	165
Noviembre	18,1	3,55	4,79	129	1325,689	1,04	3,60	3,55	147
Diciembre	18,1	4,27	4,6	220	1060,347	1,05	4,12	4,27	254
Primavera	19	4,94	2,9	216	407,6513	1,3	5,66	4,94	236
Verano	18,9	3,91	3,04	110	591,5917	1,34	4,12	3,91	118
Otoño	18,1	3,70	4,18	127	1053,8489	1,12	3,60	3,70	140
Invierno	18,2	4,37	4,2	213	914,382	1,1	4,63	4,37	244
TOTAL	18,5	4,22	3,61	167	742,2299	1,2	4,63	4,22	184

Tabla 10.1: Datos de viento para Valladolid

donde:

$$\langle A \rangle \cdot 10^4 = a10^4$$

$\langle C \rangle$ = Factor de forma

$\langle AA \rangle$ = Factor de escala = a^{-1}/C

$\langle V \rangle$ = Velocidad media = \bar{v}

F.P.E. = Factor de potencia eólica.

% HORAS = Porcentaje total mensual de horas de funcionamiento de la estación eólica. Su valor da una estimación de la fiabilidad o representatividad de los resultados.

la expresión analítica de la función de frecuencias de velocidad para las distintas estaciones nos lleva a las siguientes representaciones gráficas:

$$f(v) = aCv^{C-1}exp(-av^c) \quad (10.1)$$

Estaciones	$\langle C \rangle$	$\langle AA \rangle$
Primavera	1,36	5,66
Verano	1,34	4,12
Otoño	1,12	3,60
Invierno	1,1	4,63

Tabla 10.2: Valores de Weibull de las diferentes estaciones

La producción energética estimada para el período considerado se obtiene a partir de la curva de probabilidad de ocurrencia de cada intervalo de velocidad.

Para las cuatros estaciones estas curvas de probabilidad de ocurrencia tienen una expresión analítica en función de los valores de la tabla del INM., que se obtienen sustituyendo los valores del valor de forma C y escala $a^{\frac{1}{c}}$ en la expresión analítica general por $\langle C \rangle$ y $\langle AA \rangle$ respectivamente llegando a que:

$$P(\geq V_x) = e^{-\left(\frac{V_x}{a^{-\frac{1}{c}}}\right)^c} \cdot T = e^{-aV_x^c} = T = e^{-\frac{V_x^c}{\langle AA \rangle^{\langle C \rangle}}}.T \quad (10.2)$$

donde T es el periodo de tiempo donde se describe la probabilidad de ocurrencia de velocidades. Para curvas estacionales este valor es de 2160

horas.

Es decir, la probabilidad de que la velocidad de viento sea igual o mayor que cero es uno, que trasladado a tiempo equivale a decir que durante 2160 horas el viento supera esta velocidad.

Como se verá más adelante expresar la probabilidad en horas nos será de gran utilidad para calcular la potencia total disponible de origen eólico durante un periodo de tiempo (en este caso 3 meses).

Las expresiones analíticas de estas probabilidades nos llevan a las siguientes representaciones gráficas:

10.2 Aerogeneradores comerciales de baja potencia

Entre los principales fabricantes de aerogeneradores de bajo potencia están:

- Aerowatt
- Bryb-Bornay
- Elektro GmbH
- Enag
- Gemz
- Lübing

Un método para decidir que generador se adapta mejor a nuestras necesidades es empezar por seleccionar aquellos modelos cuya potencia nominal tenga lugar a velocidades cercanas al factor de escala de la distribución de Weibull. Buscaremos, por tanto, un aerogenerador que nos ofrezca los mejores rendimientos a la velocidad media de viento.

La velocidad media de las series de viento para Villanubla está comprendidas entre 4.12 m/seg y 5.66 m/seg.

El estudio del potencial de eólico para Piña de Esgueva se realiza con los únicos datos disponibles para la zona que son los del observatorio de la Base

MODELO	G-250W	INCLIN	300 FP7G
Vmin	2 m/seg	3 m/seg	2 m/seg
Vnom	8 m/seg	11 m/seg	8 m/seg
Pnom	250W	250W	300W
Vmax	9 m/seg	13 m/seg	14 m/seg
Num. palas	2	2	2
Diámetro	2000 mm	2000 mm	3200 mm
Peso	42 Kg	32 Kg	176 Kg
Frenado	Paso Variable	Inclinación Turbina	Mástil SH 20 A
Vout	12/24 V	12/24 V	12/24/36/48 V
Distribuidor	Bornay	Bornay	Aerowatt

Tabla 10.3: Descripción general de los modelos de aerogeneradores

Militar de Villanubla.

Mediciones realizadas durante los meses de verano en los años 1996 y 1997 en el emplazamiento nos ofrecen resultados que sitúan los datos del Villanubla como una estimación pesimista del potencial eólico disponible.

La base militar de Villanubla esta situada en un páramo mientras que Piña de Esgueva esta ubicada en un valle. Durante los meses de verano tiene lugar lo que se denomina fenómenos de “advección”

A pesar de que se utilizarán los datos procedentes de la base militar de Villanubla tendremos en cuenta que estos datos son un pronóstico pesimista del potencial eólico de la zona. Esta decisión basada en las medidas realizadas durante los últimos años (1996-1997) así como el conocimiento popular de la presencia de vientos fuertes durante la época estival nos orientan hacia aerogeneradores cuya potencia nominal este en el rango de 7 y 10 m/seg.

En este rango de potencias he seleccionado los modelos: Inclin 250 W y G-250 W de Bornay y el 300 FP7G de Aerowatt para su estudio previo.

10.2.1 Turbina INCLIN 250 W

La turbina Inclin 250 W está compuesta por un generador trifásico de imanes permanentes con un cuadro rectificador de onda completa.

V (m/seg)	Isc(A)	P(W)
4	1.7	20
6	5	60
8	11.7	140
10	17.5	210
12	20.5	245
14	21.3	255
16	10	120
18	11.7	140
20	12.5	150

Tabla 10.4: INCLIN 250W

Esta turbina tiene un sistema de frenado automático por inclinación.

A continuación se representan las medidas experimentales sobre la aeroturbina Turbina Inclin 250 W con una tensión en bornas del rectificador de onda completa de 12 Voltios.

Una aproximación polinómica de orden cuatro de la relación experimental entre potencia y velocidad de viento valida en el intervalo $v \in [2, \dots 14]$

$$\sum_{i=0}^3 a_i x_i \quad (10.3)$$

donde:

$$a_4 = 0.0097, a_3 = -0.7561, a_2 = 13.9464$$

$$a_1 = -60.7504, a_0 = 79.8832$$

10.2.2 Turbina J.BORNAY G-250 W

La turbina G-250 W está compuesta por un generador trifásico de imanes permanentes con un cuadro rectificador de onda completa.

Esta turbina tiene un sistema de frenado automático por paso variable

A continuación se representan las medidas experimentales sobre la aeroturbina Turbina Inclin 250 W con una tensión en bornas del rectificador de

onda completa de 12 Voltios.

V (m/seg)	Isc(A)	P(W)
2	0.8	10
3	3.2	38
4	5.0	60
5	6.3	75
6	8.3	100
7	12.5	150
8	19.2	230
9	29.2	350
10	6.3	75
11	7.5	90
12	9.2	110
13	10.4	125
14	12.1	145
15	13.6	163
16	15.0	180
17	16.7	200
18	18.8	225
19	20.8	250
20	22.9	275
21	25.0	300
22	29.2	350
23	29.2	350
24	29.2	350
25	29.2	350

Tabla 10.5: G-250W

Una aproximación polinómica de orden cuatro de la relación experimental entre potencia y velocidad de viento valida en el intervalo $v \in [0, \dots, 19]$

$$\sum_{i=0}^4 a_i x_i \quad (10.4)$$

donde:

$$a_5 = -0.0440, a_4 = 1.2646, a_3 = -11.785$$

$$a_2 = 45.2085, a_1 = -46.884, a_0 = 0.00$$

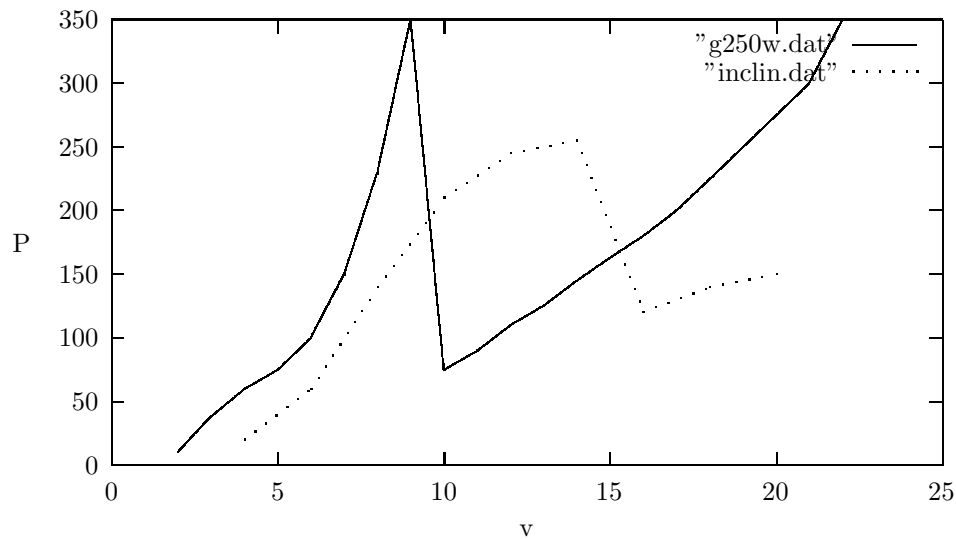


Figura 10.1: Curva de potencia para G250W e Inclín

10.2.3 Turbina 300 FP 7 G

Las características de este modelo que ofrece el fabricante las podemos ver en la Tabla [10.6].

$\langle V \rangle$	4 m/seg	5 m/seg	6 m/seg	7 m/seg
$\langle P \rangle$ est. W	105	141	171	195
$\langle E \rangle$ est. KWh	75	100	123	140

Tabla 10.6: 300 FP7G

Este es un ejemplo de las escasas especificaciones que ofrecen muchos fabricantes de aerogeneradores.

En muchos casos se ofrece sólo la potencia media estimada en W para una velocidad media determinada. Es común en muchos fabricantes y distribuidores estimar la potencia media a partir de la velocidad media obviando el *FPE* o cualquier parámetro característico de la distribución de frecuencias de velocidad. Algunos fabricantes suponen una distribución de vientos de Rayleigh (factor de forma =2).

Para una misma velocidad media podemos tener una infinita variedad

de potencia eólicas disponibles. Este error, muchas veces “intencionado” sobrestima la energía eólica disponible y genera expectativas en el usuario que terminan por desprestigiar una fuente de energía que simplemente estaba mal dimensionada.

10.3 Resultados del método para G-250W

El resultado de evaluar las diferentes funciones de distribución de probabilidad para las diferentes estaciones se resume en la siguiente tabla.

V_i	$T(h)_I$	$Ti(h)_O$	$Ti(h)_P$	$Ti(h)_V$	P(W)
0	2160	2160	2160	2160	0
1	1794.7	1702.2	1964.9	1859.2	0
2	1452	1287.1	1694.1	1477.6	10
3	1161.5	955.8	1416.7	1123.5	38
4	921.9	701.1	1157.7	826.1	60
5	727.5	509.3	928	590.9	75
6	571.3	367.2	731.6	412.8	100
7	446.8	262.9	568.4	282.4	150
8	348.2	187.2	435.7	189.6	230
9	270.5	132.6	329.9	125.0	350
10	209.6	93.5	247	81.2	75
11	162	65.6	182.9	51.9	90
12	124.8	45.9	134.2	32.7	113
13	96	32	97.5	20.4	125
14	73.7	22.2	70.2	12.5	135
15	56.5	15.4	50.1	7.6	163
16	43.2	10.6	35.5	4.6	180
17	33	7.3	24.9	2.7	200
18	25.1	5	17.4	1.6	225
19	19.1	3.4	12	0.9	250
20	14.5	2.3	8.3	0.5	275
21	11	1.6	5.6	0.3	300
22	8.4	1.1	3.8	0.1	350
23	6.3	0.7	2.6	0.1	350
24	4.8	0.5	1.7	0	350
25	3.6	0.3	1.1	0	350

Tabla 10.7: G-250W

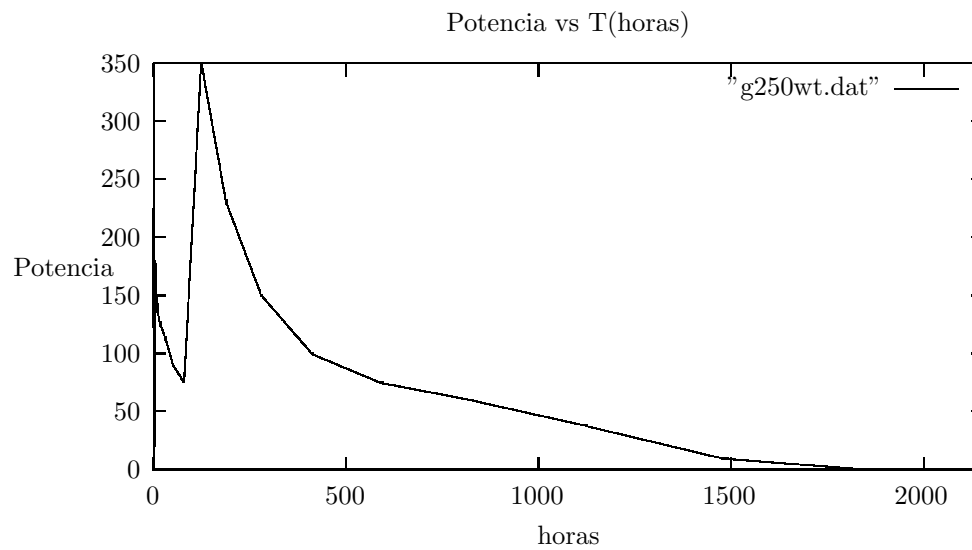


Figura 10.2: Potencia [h] para G250W

Estaciones	Energía KWh
Primavera	177.58
Verano	82.31
Otoño	110.51
Invierno	143.11

Tabla 10.8: Energía del G-250W producida en cada estación

Estaciones	Energía KWh
Enero	42.693
Febrero	53.202
Marzo	58.876
Abril	59.985
Mayo	48.626
Junio	48.719
Julio	42.498
Agosto	42.498
Septiembre	36.388
Octubre	42.719
Noviembre	37.230
Diciembre	42.678

Tabla 10.9: Energía del G-250W producida en cada mes

10.4 Resultados del método para INCLIN -250W

El resultado de evaluar las diferentes funciones de distribución de probabilidad para las diferentes estaciones se resume en la tablas siguientes.

V_i	$T_i(h)_I$	$T_i(h)_O$	$T_i(h)_P$	$T_i(h)_V$	$P(W)$
0	2160	2160	2160	2160	0
1	1702.2	1702.2	1964.9	1859.2	0
2	1287.1	1287.1	1694.1	1477.6	0
3	955.8	955.8	1416.7	1123.5	0
4	701.1	701.1	1157.7	826.1	0
5	509.3	509.3	928	590.9	40
6	367.2	367.2	731.6	412.8	60
7	262.9	262.9	568.4	282.4	100
8	187.2	187.2	435.7	189.6	140
9	132.6	132.6	329.9	125	175
10	93.5	93.5	247	81.2	200
11	65.6	65.6	182.9	51.9	220
12	45.9	45.9	134.2	32.7	245
13	32	32	97.5	20.4	250
14	22.2	22.2	70.2	12.5	255
15	15.4	15.4	50.1	7.6	180
16	10.6	10.6	35.5	4.6	120
17	7.3	7.3	24.9	2.7	140
18	5	5	17.4	1.6	150
19	3.4	3.4	12	0.9	160

Tabla 10.10: INCLIN-250W

Estaciones	Energía KWh
Primavera	126.23
Verano	71.34
Otoño	63.86
Invierno	97.68

Tabla 10.11: Energía del INCLIN-250W producida en cada estación

Estaciones	Energía KWh
Enero	27.884
Febrero	37.002
Marzo	42.110
Abril	41.869
Mayo	30.167
Junio	29.664
Julio	23.909
Agosto	23.909
Septiembre	26.553
Octubre	27.784
Noviembre	22.740
Diciembre	28.00

Tabla 10.12: Energía del INCLIN-250W producida en cada mes

10.5 G-250W Versus INCLIN

De la representación de las funciones $P(v)_{G-250W}$ y $P(v)_{INCLIN}$ en un gráfico conjunto se obtienen las siguientes conclusiones:

- El aerogenerador G-250 W trabaja en un rango de velocidades menor que el modelo Inclín.
- El aerogenerador G-250 W tiene una potencia de salida mayor que el Inclín para el margen de velocidades comprendido entre 3 y 9 m/seg (6 y 18 nudos).
- El aerogenerador G-250 W tiene una velocidad mínima de arranque menor que el Inclín.
- El aerogenerador G-250 W tiene una $P_w(v)$ con un claro carácter no-lineal. El Inclín tiene un margen lineal de funcionamiento entre 6 y 11 m/seg.
- El aerogenerador G-250 W puede trabajar hasta velocidades de 12 m/seg dando una potencia de salida de 580 W. No obstante, el sistema de abatimiento de alas limita la velocidad máxima de operación a 9 m/seg. A pesar de la limitación impuesta por V_{max} , la potencia media disponible a la salida del G-250 W para las características de

viento $f_0(v)$ es superior a la del Inclin 250 W.

La gráfica siguiente muestra la diferente producción mensual prevista de energía para G-250W e Inclin.

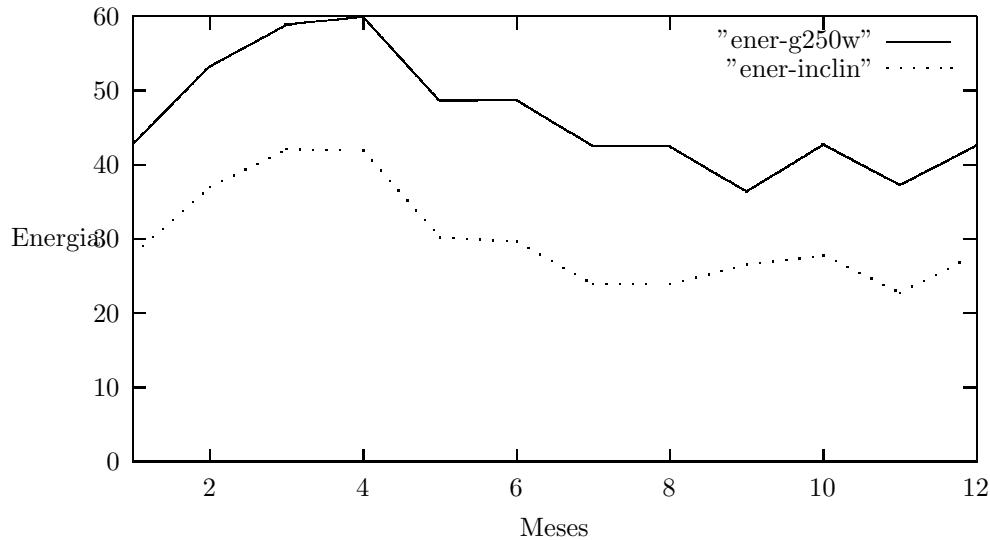


Figura 10.3: Energía mensual producida por G250W e Inclin

10.5.1 Generalización del modelo estático para aerogeneradores de la serie INCLIN

Una expresión más general de la energía eléctrica disponible consiste en intentar expresar la energía producida en un periodo temporal, T , con una distribución de vientos $f_0(v)$ en función de la P_{NOM} del aerogenerador.

Definimos como *curva de potencia normalizada* la que expresa la relación entre velocidad de viento y potencia eléctrica a la salida del aerogenerador respecto la potencia nominal, $\frac{P_{out}}{P_{NOM}}$.

La curva $[v, P_{norm}]$ es un parámetro característico de una serie de aerogeneradores de la misma familia INCLIN.

Estaciones	ϕ_{INCLIN}	ϕ_{G250W}	$\frac{\phi_{INCLIN}}{\phi_{G250W}}$
Primavera	504.92	710.32	0.71
Verano	285.36	329.24	0.87
Otoño	255.44	442.04	0.57
Invierno	390.72	572.44	0.68
Relación Media			0.71

Tabla 10.13: Horas equivalentes a potencia nominal para distintos aerogeneradores

Para una serie de aerogeneradores la expresión que relaciona la energía eléctrica producida en un periodo T , con la $f_o(v)$ y la P_{NOM} es:

$$\begin{aligned}
 E_{EL_w} &= P_{NOM} \int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}(v) dv \\
 E_{EL_w} &= P_{NOM} \phi_{fT,serie}
 \end{aligned}
 \tag{10.5}$$

Llamaremos $\phi_{fT,serie}$ al resultado de evaluar $\int_0^{+\infty} f_o(v) P_{W_{norm}}$. Esta primera generalización significa que una vez conocido el término $\phi_{fT,serie}$ bastará sustituir por la P_{NOM} del aerogenerador para obtener la energía eléctrica que suministra durante el periodo, T considerado.

ϕ tiene el significado físico de las horas equivalentes a las que un aerogenerador trabaja a P_{NOM} para una determinada distribución de vientos.

Capítulo 11

Cálculo de la demanda de energía eléctrica de la vivienda

11.1 Energía para iluminación

El mes de más necesidades de iluminación es el de diciembre. Para el mes de diciembre las necesidades de iluminación son:

Equipos	P_{NOM}	$I_A(12V)$	$I_A(24V)$	Horas
Luz Cocina	22	1.83	0.92	3
Luz C.estar	22	1.83	0.92	4
Luz C.baño	8	0.66	0.33	1
Luz Dormitorio	15	1.25	0.63	0.5
Luz Pasillos	8	0.66	0.33	4
TV (B/N)	25	2.1	1.05	4
Radio	6	0.5	0.25	1
Electrodomésticos	70	5.8	2.9	14
TOTAL	1287 Wh	107.3 Ah	53.65 Ah	

Tabla 11.1: Consumos en CC

El consumo del frigorífico es constante a lo largo del año debido a que se supone que en la ubicación del refrigerador la temperatura exterior no experimenta variaciones.

El consumo del congelador TCS 200 puede variar entre 550-1090 ($\frac{Wh}{dia}$) en

el margen de temperaturas exteriores 25-43 C.¹

Durante los meses de verano las necesidades de iluminación son del 80% de las necesarias el resto del año.

11.2 Energía para el bombeo

El mes de más necesidades de bombeo de agua es Julio-Agosto con un consumo medio de $40 \frac{m^3}{mes}$. La H_{TE} del bombeo es de 10 metros.

Las características de la bomba Shurflo 9300 son:

Shurflo 9300	
Pump Type	9300 Series
Longitud (mm)	305
Diametro (mm)	95
Inversor	NO
$P_{NOM}(W)$	100
Voltaje (V_{DC})	0-30V
H_{TE} trabajo (m)	10-55
Peso (Kg)	2.72
Caudal $\frac{l}{h}$	100-400

Tabla 11.2: Características de la bomba Shurflo 9300

La corriente en Ah que necesita la bomba durante los meses de verano se calcula suponiendo que la bomba trabaja a $P_{NOM} = 100W$. Para extraer $46m^3$ la bomba invertirá 125 horas. El resto de los meses el consumo de agua será de $10m^3$ con lo que la bomba sólo tendrá que estar en funcionamiento durante una hora.

Estos consumos equivalen a $34.7Ah_{dia}$ en el periodo estival y $8.3Ah_{dia}$ el resto del año.

¹Valores para una carga de 2Kg y 20 minutos de puerta abierta por día

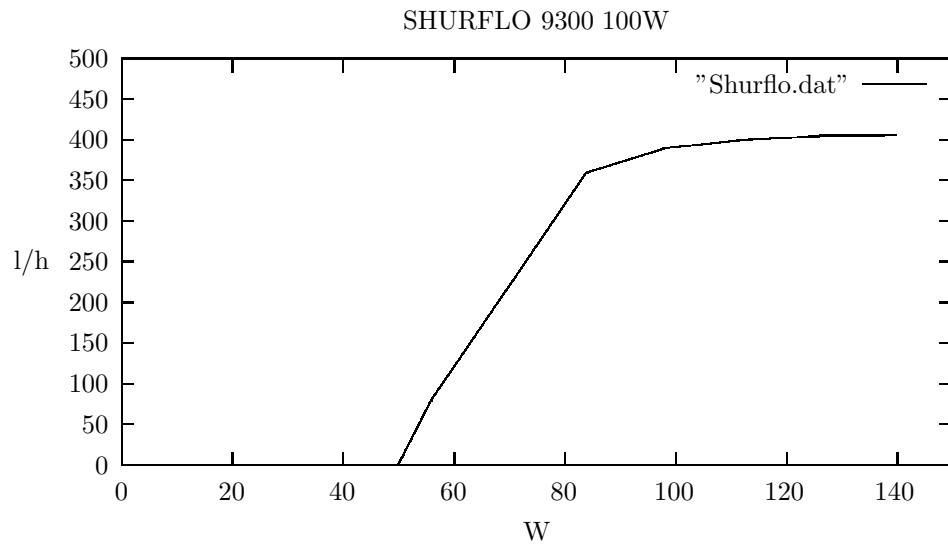


Figura 11.1: Caudal de bombeo en l/h Shurflo 9600 100W para 12 Vcc y Hte=10m

11.3 Energía para el sistema de comunicaciones

Los consumos en CC de los equipos de comunicaciones se resumen en la siguiente tabla:

Packet Radio.AX.25	
Ordenador Portatil DELL	25 W
TNC DSP PK900	12 W
Keenwood TW-4000A (RX)	10 W
Keenwood TW-4000A (TX)	80 W
TOTAL RX	47 W
TOTAL TX	117 W

Tabla 11.3: Consumos para el nodo de comunicaciones.

El consumo diario del nodo de comunicaciones es de $14Ah$ y se calcula teniendo en cuenta que el tiempo de operación es de 2 horas y que el equipo de radio trabaja en transmisión durante la mitad de ese tiempo.

11.4 Consumo mensual total en Ah

Equipos/Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Iluminacion	26	26	26	26	26	20	20	20	26	26	26	26
Electrodomésticos	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Nodo Comunic.	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Bombeo Agua	8	8	8	8	8	20	34	34	20	8	8	8
TOTAL (Ah)	128	128	128	128	128	134	148	148	140	128	128	128

Tabla 11.4: Resultado final del consumo en CC de la vivienda

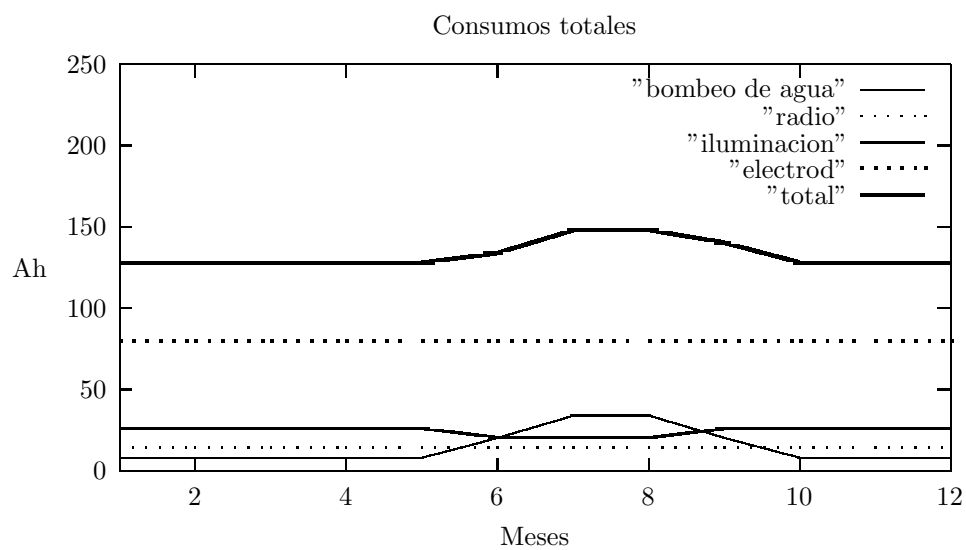


Figura 11.2: Consumos totales en CC

Capítulo 12

Resumen de resultados y dimensionado final

12.1 Resultados del SMFV

El resultado de la aplicación del método del IES para el cálculo de la *LLP* se resume en la Tabla [12.1]. Estos valores se han obtenido a partir la simulación descrita en [3.1] utilizando una serie sintética de datos de irradiación media diaria.

Las series sintéticas se han generado utilizando el método de matrices de Markov descrito en [Valverde 92]

	<i>LLP</i> 0.01	<i>LLP</i> 0.025	<i>LLP</i> 0.05	<i>LLP</i> 0.075	<i>LLP</i> 0.10	<i>LLP</i> 0.2
f	0,67929	0,4703	0,33868	0,27627	0,24123	0,17594
u	0,19324	0,116	0,06854	0,04421	0,02212	0,00187

Tabla 12.1: Resultados finales de la simulación LLP. (IES)

12.2 Resultados del SME

A continuación se representan los coeficientes ϕ_{INCLIN} y ϕ_{G250W} [4.25] y la energía mensual en *KWh* que produce el aerogenerador G250W.

Estaciones	ϕ_{G250W}
Primavera	710.32
Verano	329.24
Otoño	442.04
Invierno	572.44

Tabla 12.2: Horas mensuales equivalentes a potencia nominal para el G250-W

Estaciones	Energía KWh
Enero	42.693
Febrero	53.202
Marzo	58.876
Abril	59.985
Mayo	48.626
Junio	48.719
Julio	42.498
Agosto	42.498
Septiembre	36.388
Octubre	42.719
Noviembre	37.230
Diciembre	42.678

Tabla 12.3: Energía del G-250W producida en cada mes

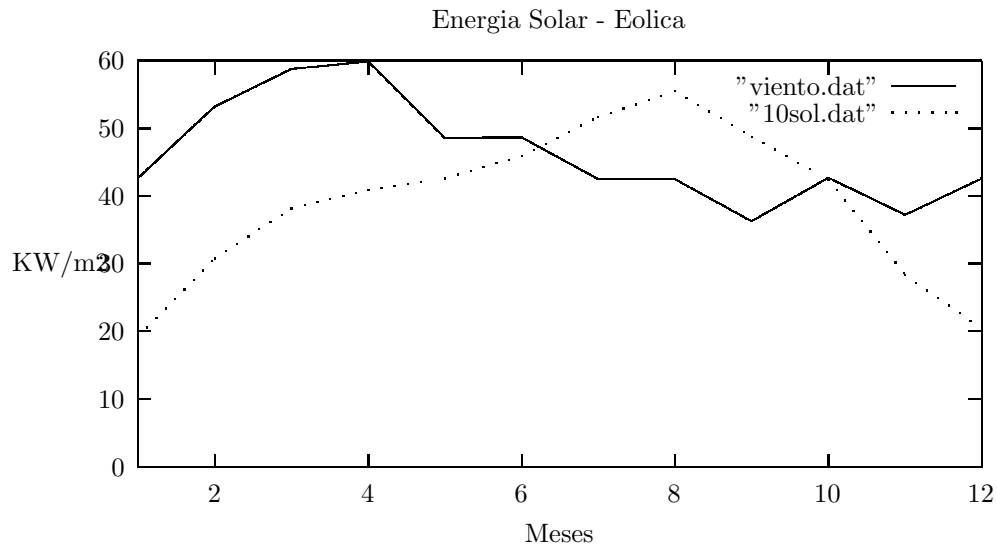


Figura 12.1: Energía de la G250W vs Irradiación en el plano del array (60)

12.3 Resultado final de la demanda energética

A continuación se representa la variación del valor L a lo largo del año y la contribución de cada uno de los consumos.

Equipos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Iluminacion	26	26	26	26	26	20	20	20	26	26	26	26
Electrodomésticos	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Nodo Comunic.	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Bombeo Agua	8	8	8	8	8	20	34	34	20	8	8	8
TOTAL (Ah)	128	128	128	128	128	134	148	148	140	128	128	128

12.4 Oferta/Demanda respecto a sus valores medios

Calculamos el valor medio de cada una de las fuentes de energía a la largo del año, llegando a los siguientes resultados:

$$L = 132Ah \quad (12.1)$$

$$G_{dm_{annual}} = 3.872 \frac{KWh}{m^2}$$

$$E_{EL_{wm_{annual}}} = 46.3KWh \quad (12.2)$$

A partir de estos valores construimos la siguiente tabla que representa las variaciones porcentuales respecto a los valores medios.

Equipos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Carga	-3	-3	-3	-3	.3	+1.5	+12	+12	+6	-3	-3	-3
Sol	-50	-20	-1	+7	+10	+18	+33	+43	+26	+17	-26	-47
Viento	-8	+14	+26	+29	+5	+5	-8	-8	-21	-7	-20	-8

Tabla 12.4: Valor relativo de la oferta y la demanda respecto a sus valores medios

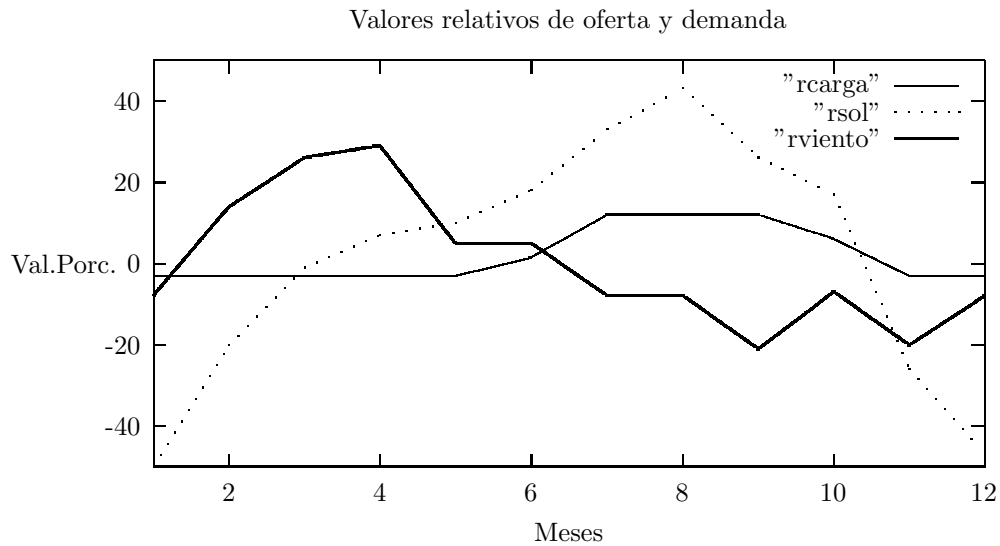


Figura 12.2: Valor relativo de la oferta y la demanda respecto a su valor medio

12.5 Dimesionado final

El resultado de aplicar el método de simulación para una $LLP = 0.2$ nos conduce a los siguientes resultados:

Localidad	: VALLADOLID
Latitud	: 41.70 N
Longitud	: 4.85 W
Peor mes	: 12
Número de días	: 4371
Serie de entrada	: Serie sintética.
Tensión nominal del generador (V)	: 12
Radiación de referencia (W/m ²)	: 1248
Consumo de referencia (W/m ²)	: 1536
Método de cálculo de radiación sobre plano inclinado	: Hay-diario

(a) EFICIENCIAS

de conexionado	: 0.950
de cableado	: 0.950
de acondicionamiento de potencia del módulo	: 0.900
de la batería	: 0.125
	: 0.950

(b) DATOS DE CONSUMO

Consumo variable mes a mes (Wh-Ah)

Enero	: 1536 Wh 128 Ah
Febrero	: 1536 Wh 128 Ah
Marzo	: 1536 Wh 128 Ah
Abril	: 1536 Wh 128 Ah
Mayo	: 1536 Wh 128 Ah
Junio	: 1608 Wh 134 Ah
Julio	: 1776 Wh 148 Ah
Agosto	: 1776 Wh 148 Ah
Septiembre	: 1680 Wh 140 Ah
Octubre	: 1536 Wh 128 Ah
Noviembre	: 1536 Wh 128 Ah

Diciembre : 1536 Wh 128 Ah

(c) DATOS DEL MODULO FOTOVOLTAICO

Código : PV I-53
Potencia nominal (W) : 53
Ancho (mm) : 328
Largo (mm) : 1290
Coste del módulo (miles ptas) : 60

Parámetro f : 0.1826

Parámetro u : 0.0018

(d) DATOS DE LA BATERIA

Código : FAAM
Capacidad del vaso (C100) : 360
Tensión del vaso (6x2 V) : 12
Coste de los vasos (miles ptas) : 130

(e) SOLUCION OBTENIDA CON ESTOS DATOS

Capacidad de batería y array óptima : 2.0 0.182
Capacidad de batería : 1.870
Capacidad de array : 0.210
Inclinación del panel : 50
Número total de módulos : 6
 serie : 1
 paralelo : 6
Número total de vasos : 1
 serie : 1
 paralelo : 1
Coste total (miles de pesetas) : 452
Probabilidad de pérdida de carga pedida : 0.2000
Probabilidad de pérdida de carga obtenida : 0.1514

12.6 Esquema de la instalación del SHEFV

El esquema de la instalación propuesta lo forman:

- **A** Generador Solar

Lo componen 6 módulos de 53Wp de rendimiento 12.5% orientados al sur y con una inclinación de 50 grados.

La tensión del generador fotovoltaico es de 12 V, es decir, el interconexión de los módulos es en paralelo.

PV I-53	
Físicas	
Células cuadradas	Silicio Monocristalino
Altura	1290 mm
Ancho	328 mm
Espesor	34 mm
Peso	5.7 Kg
Celulas en serie	36
Superficie célula	103.6 cm^2
Eléctricas	
Potencia máxima	53 W
I_{cc}	3.27 A
V_{oc}	21.8 V
I_{max}	3.05 A
V_{max}	17.4 A

- **B** Generador Eólico

El generador eólico elegido es el G-250W. Se ha elegido el rectificador de doble onda con salida en corriente continua de 12V.

- **C** Regulador de carga

SOLENER. Regulador digital 30A 12V

- **D** Iluminación, Electrodomésticos, Equipos de radiocomunicaciones

- Reactancias de 8, 15 y 22W. 12 V
- TRS300. Arcón frigorífico.70 W 12 V
- Nodo de comunicaciones

MODELO	G-250W
Vmin	2 m/seg
Vnom	8 m/seg
Pnom	250W
Vmax	9 m/seg
N. palas	2
Diámetro	2000 mm
Peso	42 Kg
Frenado	Paso Variable
Vout	12/24 V
Distribuidor	Bornay

Tabla 12.5: Descripción general del aerogenerador G-250W

- Ordenador Portatil DELL 25 W
- TNC DSP PK900 12 W
- Keenwood TW-4000A (RX)10 W (TX) 80 W
- Radio 6 W
- TV B/N 25 W
- **E** Bomba de CC
bomba Shurflo 9300. 100 W 12 V. 400 l/h. $H_{TE}=10\text{m}$
- **F** Batería.
ELEKTRON. FAMM 6 Vasos 12 V. 360 Ah (C-100)

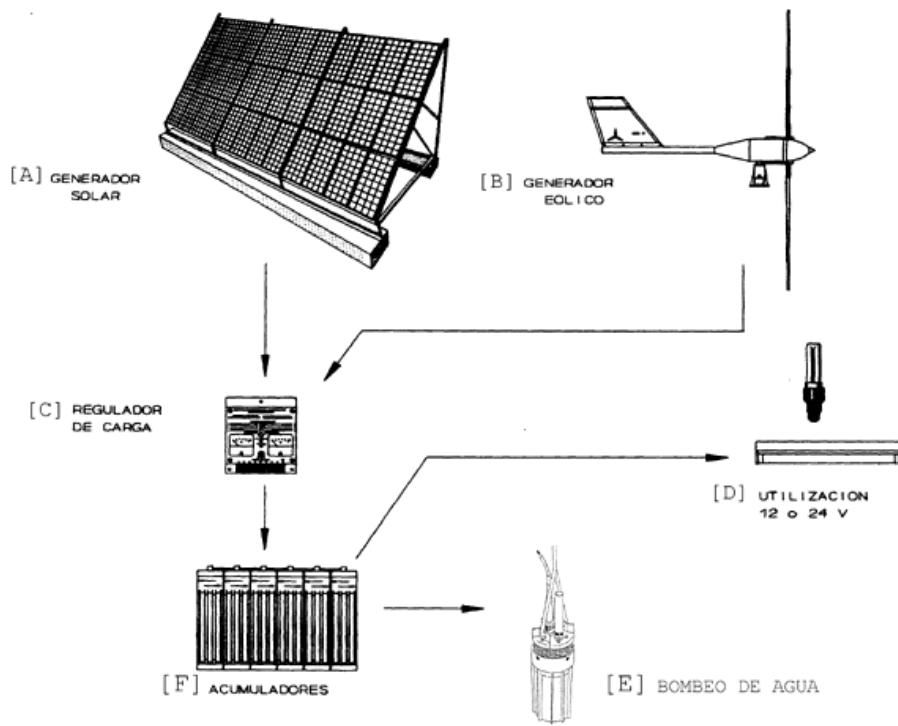


Figura 12.3: Esquema de la instalación del SHEFV

Parte V

Conclusiones

Capítulo 13

Conclusiones

13.1 Aspectos relacionados con la energía eólica y los aerogeneradores

13.1.1 Escalabilidad de aeroturbinas

Los aerogeneradores no son escalables, es decir, aunque la energía cinética del aire es proporcional a la superficie barrida por las palas o lo que es lo mismo al cuadrado del radio, no existen unas reglas fáciles de aplicar que permitan diseñar un aerogenerador que produzca el doble de energía que otro. Esta propiedad es intrínseca a la característica del aire como fluido y su distinto comportamiento a diferentes velocidades. Desde un punto de vista más intuitivo podemos decir que un aerogenerador de radio doble a otro no tiene que producir cuatro veces más energía.

13.1.2 Curva de potencia de aeroturbinas

Como hemos visto dos aerogeneradores de misma potencia nominal pueden producir cantidades de energía muy diferentes con un determinado régimen de vientos. La curva de potencia de un aerogenerador está estrechamente ligada a las características aerodinámicas de las palas y por lo tanto a las velocidades de viento para las que está diseñado. A la hora de elegir un aerogenerador elegiremos aquel cuya velocidad óptima de diseño sea del orden de la velocidad media del emplazamiento.

Factor de forma.

Aunque en primera aproximación elegiremos los aerogeneradores cuya velocidad óptima de trabajo sea cercana a la velocidad media del emplazamiento debemos tener la marcada dependencia de la LLP con el factor de forma.

Discontinuidades e irregularidades en la curva de potencia.

El comportamiento de los aerogeneradores a baja velocidad de viento (en arranque) o cuando superan la velocidad máxima de operación incorporan al modelo nuevas dificultades en la simulación. Dependiendo del mecanismo que se elija para proteger el aerogenerador para fuertes rachas de viento se obtendrán curvas de potencia de muy distinta naturaleza. La importancia de obtener buenos modelos en las zonas extremas de la curva de potencia responde a distintos motivos; en la zona de bajas velocidades debido a la gran cantidad de horas que la máquina suele estar en esta zona de operación y en la zona de altas velocidades por su marcado carácter no lineal.

13.1.3 Modelo de simulación Langer-Beyer.

En el modelo de simulación para SHEFV de Langer-Beyer se obtienen resultados de dudosa aplicación práctica. La interpretación de C_{A_w} presupone la escalabilidad de los aerogeneradores o que dada una curva normalizada podemos disponer de una turbina de potencia nominal cualquiera. Desde el punto de vista práctico el procedimiento es el inverso, es decir, existen un conjunto de aerogeneradores comerciales con valores de potencia nominal y curvas de potencia conocidas y necesitamos conocer como se comportarán en determinadas condiciones de viento.

13.1.4 Generación de series de series de viento

La validez de las series de viento es un tema de difícil consenso dentro de la comunidad científica. Aunque se están haciendo esfuerzos para encontrar modelos que permitan obtener series de vientos a partir de datos de emplazamientos cercanos $WASP^1$ todo parece indicar que se está muy lejos de

¹Es el modelo utilizado para la elaboración del Atlas Eólico Europeo. Desarrollado por Riso National Laboratory de Dinamarca

encontrar modelos viables.

Aunque el modelo de generación tiene como principales ventajas su facilidad de uso y la necesidad de un solo laboratorio sus inconvenientes vienen con topografías complejas donde no se cumple la ecuación del equilibrio geostrófico. En la práctica su uso debe limitarse a topografías no muy complejas y a la realización de depuración de datos de las observaciones.[MEE 90]

13.2 Aspectos relacionados con la energía solar fotovoltaica

13.2.1 Método de Barra utilizado por Langer-Beyer

El método de Barra exhibe diferencias que exceden lo esperable de la variabilidad del clima, en algún intervalo de interés de C_S . El modelo de Barra conduce sistemáticamente al sobredimensionamiento de los generadores.[Egido 92]

13.2.2 Generación de series diarias a partir de pocos datos históricos

El método de Markov nos ha permitido generar una serie diaria de 8400 valores a partir de 929 datos históricos. La escasez de datos históricos de radiación solar para el emplazamiento nos obliga a trabajar con bajas LLP

13.3 Aspectos relacionados con la “Permacultura”

La “Permacultura” incorpora técnicas que inciden directamente sobre la energía eléctrica que es necesario suministrar a la viviendas rurales. Un buen diseño de la vivienda y una práctica agrícola adecuada reduce considerablemente el consumo de agua y de electricidad.

Debe darse igual importancia a los modelos que se encargan de estimar el potencial eólico y fotovoltaico como a la correcta evaluación de las necesidades eléctricas de la vivienda.

13.4 Aspectos relacionados con el dimensionado final

Debido a los escasos datos de radiación para el emplazamiento y ante inexistencia de series diarias de viento se dimensionará el SMFV con una *LLP* baja y se utilizará la velocidad media de viento para estimar la fracción de energía que aportará el SME.

Apéndice A

Estructuras y sistemas en “Permacultura”

El diseño eficiente de una casa está basado en la energía natural que entra en el sistema, (procedente del sol, viento, lluvia) en la vegetación de alrededor y en las técnicas aplicadas al construirla.

Muchas casas ya están construidas o en proceso de construcción sin considerar la falta de combustible en el futuro ni el creciente precio del mismo en el presente. Sin embargo, con la correcta ubicación, el diseño adecuado para cada clima, las ayudas tecnológicas y algunos cambios en el hábitos podemos reducir o eliminar nuestra dependencia de energía de los hidrocarburos para calentar y refrescar la casa.

Las reglas generales para ubicar la casa y la planificación de la vegetación de los alrededores para el control del microclima, se discuten en otros apartados de la “permacultura” y deben ser de necesario e indispensable conocimiento.

A.1 La integración de la casa y el huerto

De la misma manera que no hay razón para separar estrictamente el huerto de la finca, la casa y el huerto deberían estar muy integrados. Los techos de césped, las paredes y enrejados con juncos añadidos a la casa proporcionan aislamiento externo y los invernaderos y casas de sombra producen alimento y modificación del clima. Los patios interiores son fuente importante de aire fresco, el cual puede ser succionado de pantallas para refrescar la casa en el

verano.

Si estamos diseñando casas nuevas o modificándolas, podemos arreglarlo de manera tal que podamos caminar desde la cocina hasta el invernadero o hasta la casa de sombra, o podemos intentar tener una vista directa de los mismos desde el lavaplatos.

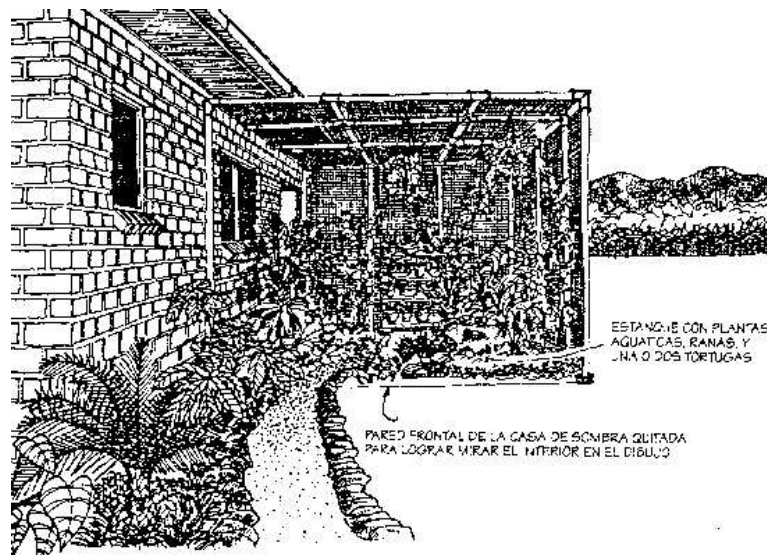


Figura A.1: Diseño de la casa de sombra anexa a la ventana de la cocina

No es mala idea introducir un poco de vida en éstas áreas; quizá una nidada de codornices. Las codornices son buenas compañeras ya que corren para atrapar los insectos; las ranas saltan desde el estanque hasta las hojas y hasta se adhieren a la ventana de la cocina. Si tiene que estar en un lugar haciendo un trabajo tedioso, por lo menos haga este sitio interesante. Ponga unas pocas tortugas autóctonas -no las que muerden- en el estanque. Las tortugas desaparecen frecuentemente dentro del *mulch*, comiendo babosas y gusanos. Y en los climas más calientes, no hay nada mejor que tener un Geko (lagarto). El geko habita sin problemas en los invernaderos.

La ducha puede ser parte del invernadero para liberar vapor, calor y agua hacia el área de cultivo. El agua que ha sido usada en la ducha, mantiene alta la temperatura de la tierra si se almacena en un tanque de barro sellado o en tubo bajo el piso del invernadero.

El camino desde el jardín a la entrada debería estar diseñado con el objeto de ahorrar trabajo doméstico evitando llevar barro dentro de la casa.

Para el cociner@/jardiner@ es de particular interés el esquema y la inclusión de un cuarto trastero y de preparación de alimentos justo fuera de la cocina llamado el "cuarto de barro". Este cuarto sirve como un vínculo entre el jardín y la cocina y puede contener:

- Areas de almacenamiento de alimentos dispuestas en estantes de una despensa, el congelador y la refrigeradora para los productos enlatados en la casa. ollas de encurtidos y aceitunas, equipo de fabricación de vino o cerveza - hierbas secas frutas y almacenaje de tubérculos y carnes o pescado en conserva.
- Areas de lavado y preparación para el uso inmediato o para la conserva de productos del huerto y el huerto frutal. Un balde para el abono cerca de la pila de lavado para almacenar las hojas, raíces puntas de los vegetales (desechos) para más tarde devolverlos al suelo del jardín.
- Un área oscura para crecer hongos y champiñones.
- Un espacio para ropas de invierno, zapatos y botas para el jardín y artículos pequeños e importantes para coleccionar alimentos (podadoras, cuchillos, canastas).
- Una espacio para la carpintería y un banco de trabajo; un lugar para guardar herramientas.
- Un área fría y seca para almacenar semillas y un espacio con un escritorio para ubicar los calendarios del jardín, los planos y los diarios anuales.
- Almacenamiento de leña con un acceso para la estufa de madera en la cocina.

A.2 La casa en los climas templados

A menos que las áreas templadas estén localizadas al borde del mar (donde las temperaturas son más uniformes) éste tipo de viviendas son frías en invierno y calientes en verano. Así, el diseño de la casa debe acomodarse a dos

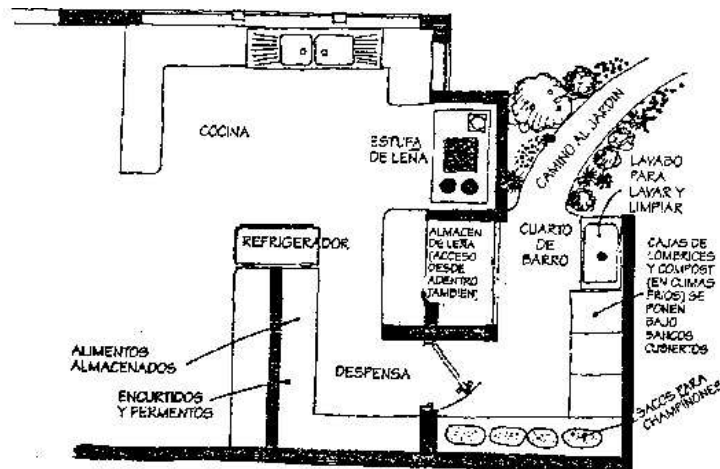


Figura A.2: "El cuarto de lodo" como un área de preparación y almacenamiento una la casa y el jardín

objetivos diferentes. Durante el invierno debe preservarse el calor en la casa y el frío debe mantenerse afuera. En el verano, el calor debe ser excluido del interior, la casa debe estar abierta a las brisas frescas de la tarde. Las casas que hacen un uso eficiente de energía pueden cumplir ambos objetivos a través de un diseño cuidadoso. Los puntos esenciales para hacer un buen diseño de una casa en los climas templados se dan a continuación.

A.2.1 Proporciones y ubicación de las ventanas

Las casas no deben tener más que dos cuartos grandes, con el eje este/oeste 1.5 veces más largo que el eje norte/sur. El eje este/oeste debe estar de cara al sol (norte en el hemisferio sur y sur en el hemisferio norte). El diseño de la casa está planificado de tal manera que las habitaciones u otros cuartos que no se usan muy frecuentemente estén ubicados en el lado de la sombra de la construcción, mientras que las áreas de actividad se localizan en el lado que mira al sol para mantener el calor en el invierno.

El alero de la casa y la profundidad de las ventanas, están diseñadas de forma que el sol llegue directamente dentro de la casa a través de las ventanas en invierno (y dé hacia un piso de piedra grandes o una pared interior de ladrillos y otra que guarde el calor), pero que no entre en el verano.

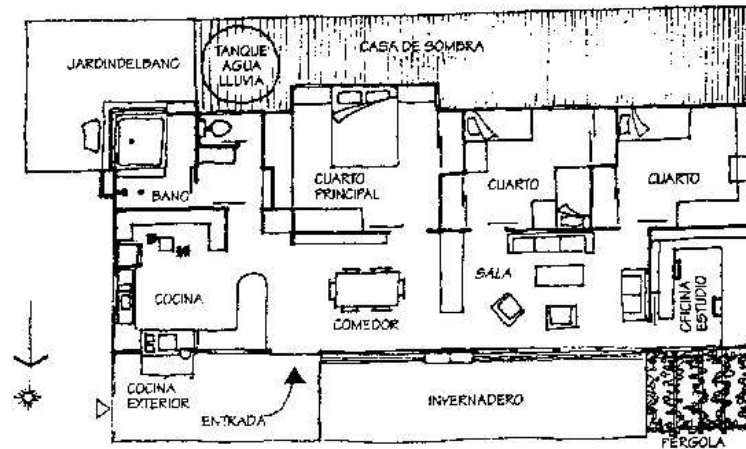


Figura A.3: Las casas de clima templado contemplan la posibilidad de ubicar los cuartos en el lado de sombra y las áreas de trabajo en el lado de soleado.

Las ventanas pequeñas están localizadas en el lado este de la casa para capturar el sol de la mañana. Hay unas pocas ventanas en el lado oeste o en los lados de la edificación que enfrentan la sombra, pues la orientación hacia el oeste concentra el calor en el verano y el brillo de la nieve en el invierno. Las ventanas se cubren con cortinas pesadas, que cubren desde el cielo raso hasta el piso y se cierran en las noches en el invierno, En verano, las ventanas se dejan abiertas durante la noche para dejar que la casa se refresque y se cierran en la mañana. Las persianas de bambú enrollables se ubican fuera de las ventanas del este y el oeste para evitar el golpe del sol dentro de la casa en los días particularmente calientes.

La orientación de la sombra (sur en el hemisferio sur; norte en el hemisferio norte) se acomoda a una casa de sombra que tiene una ventana bien aislada; ésta ventana se abre bien dentro de la casa principal para traer aire fresco a ella durante los veranos fuertes.

A.2.2 Aislamiento

La casa debe estar bien aislada (pisos, cielo rasos y debe haberse aislado por lo menos 1 metro del suelo alrededor del perímetro de la casa, usando una base de concreto). El aislamiento del suelo es hecho de una espuma rígida, la cual es de solamente 4-5 cm. de grueso. Usualmente el aislamiento más grueso o más pesado, se ubica en el cielo raso para mantener el aire caliente

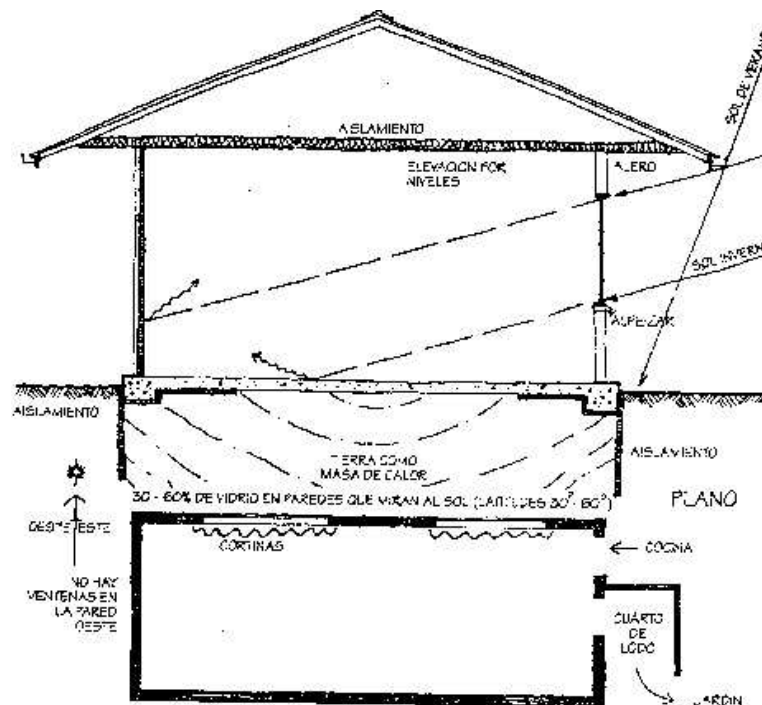


Figura A.4: Los aleros y ventanas de la casa se ubican de manera tal que el sol invernal entre a la casa pero no el veraniego.

dentro de la casa en los meses de invierno.

Las rejillas de ventilación se ubican en los áticos y los cielos rasos para controlar los daños causados por la condensación y para permitir que el exceso de calor escape durante el verano. Las corrientes de aire alrededor de puertas y ventanas se bloquean con tiras de aislamiento. (cintas engomadas).

El sol que entra a través de las ventanas en el invierno debe incidir sobre una masa térmica, que puede ser un piso de cemento, una pared de ladrillo/piedra o tanques de agua.

El aislamiento es esencial en las áreas templadas y frías, sin embargo, se debe tener cuidado en mantener una ventilación adecuada, especialmente en las situaciones donde las casas están situadas cerca a áreas sujetas a emisiones de radón (un gas emitido por el granito, la dolerita y otras muchas rocas ígneas).

Todos estas masas actúan como almacenes de calor, que devuelven dentro de la casa en la noche. Durante el verano una masa térmica permanece fría en el día si se expone al aire frío nocturno (las ventanas se dejan abiertas en la noche).

Las construcciones exteriores, adjuntas a la casa, ubicadas en el sector de la sombra o del viento, aíslan la casa de los vientos fríos invernales.

A.2.3 Materiales naturales de aislamiento

Hay muchos aisladores de calor excelentes que se pueden encontrar en el mundo natural, algunos de ellos ya han sido empleados en refrigeración, construcción de casas o como supresores de ruido. Algunos son inflamables y pueden ser tratados para que ardan lentamente, con el uso del calcio clorado, más que para que se inflamen. Algunos de éstos materiales son inmunes a las plagas (por ejemplo, el aserrín procedente de los árboles ya conocidos como inmunes a las plagas), pero cualquier material puede ser tratado para controlar las plagas usando productos naturales como el polvo o el aceite de las hojas del cedro blanco, el polvo de Derris (*Derris* sp) o sustancias similares.

A continuación se da una lista de potenciales aislantes naturales:

- *Serrín*: fue usado ampliamente en las antiguas habitaciones de refrigeración: para esto se necesita una barrera de vapor o embolsar el serrín en plásticos y sellarlo.
- *Lana*: es excelente para retardar el fuego y guardar el calor como lo es el fieltro los productos de lana o las pieles.
- *Plumas*: han sido usadas durante siglos en camas y son útiles en paredes, cielos rasos. Se necesita ponerlas en bolsas de malla fina para que no se esparzan con el viento.
- *Kapok (algodocillo vegetal)*: se ha usado ampliamente en la elaboración de camas, también en paredes en cielos rasos.
- *Hierba marina (Zostera. Posidonia. Ruppia)*: Seca y parcialmente compactada: es una pared tradicional un buen aislante de techo con bajo riesgo de fuego.
- *Paja*: un buen aislante; en la actualidad el fuego ya no es un problema. Ahora esta disponible a nivel comercial como láminas compactas contra el fuego para usar co cielo rasos (se atan con alambre o se tejen entre ellas).
- *Corcho*: como gránulo, planchas, lozas, bloques compactos.
- *Desechos de fibras*: por ejemplo de raíces procesadas de regaliz y de la fibra de la cáscara del coco, el cual también es apto para hacer esteras enrollables- en muchos casos, la cáscara del coco es inmune a las plagas.
- *Papel*: los residuos de papel picado sumergidos en una solución que contiene una parte de bórax y diez de agua son un buen aislante.
- *Balsa*: tanto la madera en sí misma como el algodón procedente de las cápsulas de las semillas han sido usados desde hace tiempo como aisladores. Como los árboles crecen rápido en los trópicos húmedos, si se siembra ésta especie se hace un buen uso de la tierra ya que producen bloques para aislamiento.

A.2.4 Plantando alrededor de la casa

Los árboles de hoja caduca plantados en el lado que da hacia el sol y en el lado este de la casa permiten que el sol del invierno penetre en ella en el otoño e invierno. Cuando los árboles están llenos de hojas, sombream la casa en el verano impidiendo que el sol golpee directamente todo el techo. Los

enrejados de viñas de hoja caduca (*Weisteria floribunda*, vides) localizados en los sitios estratégicos alrededor de la casa, proveen algún efecto de sombra mientras los árboles están creciendo.

Las paredes del lado oeste y aquellas que miran hacia la sombra, están disponibles para enrejados siempre verdes y arbustos con el objeto de proteger éstas áreas de la exposición al calor en el verano y los vientos fríos en invierno.

El objetivo del diseño de la casa es reducir o eliminar la necesidad de energía eléctrica o de gas para calentarla o enfriarla. Este objetivo se cumple porque el calor del sol está regulado y almacenado en las masas de calor de los pisos, paredes y tanques de agua y, además, porque se excluyen los vientos. Todo lo que se necesita para mantener el aire de cada espacio caliente es el calor corporal, cocinar y una pequeña estufa.

En las áreas donde ocurren inviernos fríos severos, los problemas específicos de la casa es el precio de la calefacción, la cantidad de nieve acumulada, la condensación, los vientos fríos y la humedad. Los tipos de casas que se encuentran en éstas áreas son en conjunto, de pisos múltiples, techos inclinados, calentadas por radiación y aisladas en las áreas rurales, las casas están unidas a los establos si es posible con un aislamiento terrestre de 1.2 metros. Los sótanos o bodegas subterráneos son comúnmente usados para almacenar carbón mineral y madera, mantener camas para lombrices, agujeros grandes para recolectar estiércol (bajo el establo) y el almacenamiento de tubérculos.

A.2.5 El invernadero adjunto a la casa de sombra

Un invernadero adjunto a la casa no necesita ser de gran tamaño para proveer el calor.

Los criterios más importantes son el aislamiento pesado de la base, especialmente alrededor de los cimientos y cualquier pared expuesta; y poner rejillas de ventilación arriba y abajo, bien selladas y aisladas para la buena circulación del aire dentro de la casa.

El mejor almacén de calor es el agua puesta en contenedores de 45-180 litros; éstos pueden ubicarse bajo los bancales o en la parte de atrás del invernadero sobre los semilleros y/o bancales de crecimiento de las plantas. Los contenedores o barriles pintados de color negro absorberán rápidamente el calor del sol mientras que los barriles pintados de blanco reflejan la luz

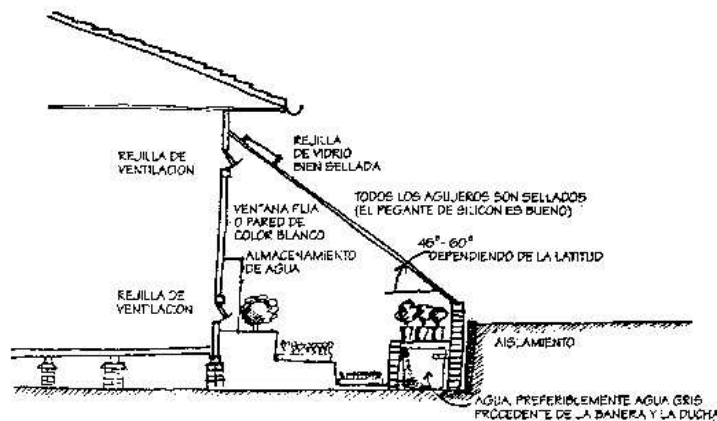


Figura A.5: El invernadero en el lado soleado de la casa ayuda en la calefacción especialmente en los climas fríos.

del sol y favorecen el crecimiento más estable de las plantas. Una mezcla de ambos tipos de barriles será la mejor elección.

Los paneles de doble vidrio son los más resistentes y eficientes y guardan el calor por más tiempo que los vidrios simples. Los bastidores o estructuras de madera se usan para prevenir el escape de calor (los bastidores de metal pierden el calor rápidamente).

Para que circule una brisa refrescante en el verano (usualmente la de la tarde), una casa de sombra -anexa al lado sombreado de la casa- es una parte importante del sistema de invernadero.

Los tanques de agua pueden cubrirse con viñas en la casa de sombra para hacer un bloque frío de aire/agua. Tanto la casa de sombra como el invernadero proporcionan alimento a la familia mientras están reduciendo los costes derivados del gasto del combustible.

A.3 Modificación de la casa

Muchas casas que ya están construidas deben ser modificadas de manera tal que sean más eficientes energéticamente. El principal problema radica en la frecuente disposición de las casas viejas, las cuales miran más hacia la carre-

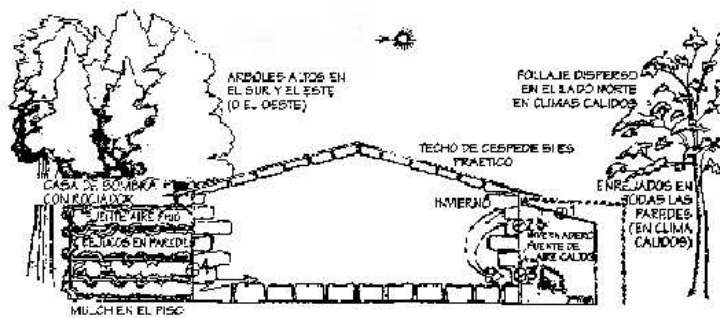


Figura A.6: El aire frío circula desde la casa de sombra hasta la casa atraído por el invernadero.

tera que hacia el sol y debido a la manía de instalar ventanas de vidrio en todas las paredes que dan al exterior.

Podemos resumir algunas maneras de hacer que las casas ya construidas sean más eficientes energéticamente en el siguiente orden de prioridades:

- Asegure cuidadosamente todas las puertas y ventanas contra los vientos. Es esencial cerrar todas las aperturas para impedir el escape de calor la entrada del frío en la casa.
- Aísle paredes cielos rasos. esto puede reducir las cuentas de calefacción y del aire acondicionado en más de un 50%. Si es posible. anexe un invernadero en el lado que da hacia el sol, una mejora puede estar constituida por una simple ventana-invernadero y una luceta, porque ambas brindan entrada de luz solar y favorecen el crecimiento de plantas. El uso de doble vidrio es esencial en las áreas de clima templado.
- Añada en el invernadero o en cuartos cálidos aislados, masas de calor como laminas de cemento, tanques y ladrillos o algo construido con piedras.
- Añada una casa de sombra en el lado sombreado de la casa principal en los climas calientes con el objeto de llevar aire fresco a la casa y ahorrar aire acondicionado.
- Ubique un calentador solar para agua caliente en el techo, con el objeto de reducir o eliminar el uso de los calentadores que utilizan combustible.

- Use vegetación para el control del microclima, por ejemplo, plante árboles en forma de una trampa de sol, anexe enrejados o arbustos orientados hacia el oeste y la sombra, plante árboles de hoja caduca o viñas en el lado que mira hacia el sol y siembre árboles rompevientos en el sector de los vientos.

Las casas bien diseñadas son más baratas de mantener que las casas que necesitan sistemas costosos que consumen energía (calentadores y aire acondicionado) y permiten que la gente sobrevivir con calor y confort sin utilizar el recurso procedente de las fuentes de hidrocarburos. No es necesario y mucho menos racional construir ningún tipo de casa más que aquella que ahorre o genere energía. El diseño para las casas en las zonas subtropicales y frías/áridas es similar al diseño hecho para las casas en los climas templados, porque las temperaturas pueden bajar hasta los 0°C en casi todas las áreas con la excepción de las laderas medias y las laderas altas. Sin embargo, la casa subtropical puede tener algunas de las características de la casa tropical.

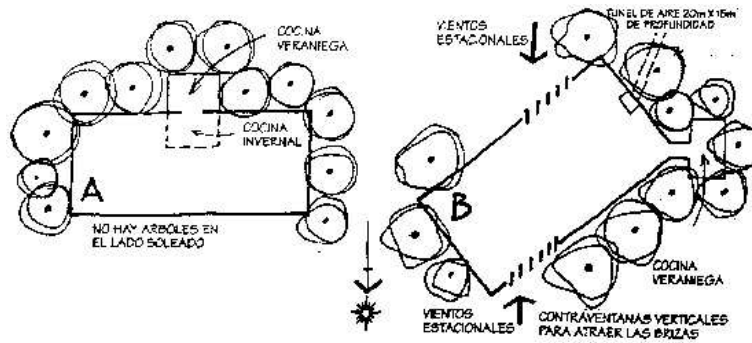


Figura A.7: Ubicación de casas en los subtrópicos (A) donde la orientación es hacia el sol debido a los inviernos fríos y en los trópicos (B) donde la casa se orienta hacia las brisas frescas y esta rodeada de sombra.

A.4 La casa en los climas tropicales

Usualmente, los trópicos húmedos están más sujetos a sufrir catástrofes periódicas que las tierras templadas (con la excepción de catástrofes ocasionada por el fuego), así los únicos sitios seguros a largo plazo para ubicar la casa son:

- Los sitios ubicados más allá de las olas tsunami (olas producidas por los maremotos).

- Los sitios protegidos de los caminos o rutas de los ciclones y huracanes.
- Por encima de los valles, estos últimos reciben el flujo de barro o ceniza volcánica.
- Fuera del camino de avalanchas de roca o lodo causadas por el tala rasa, un terremoto o lluvias torrenciales.
- En la costa firme, fuera de las playas arenosas que son fácilmente erodables.

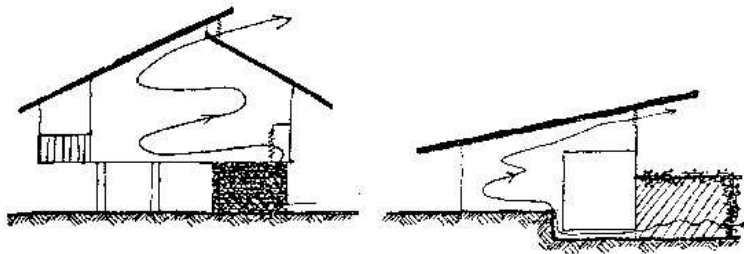


Figura A.8: Los techos con rejillas de ventilación permiten que el aire caliente del cuarto escape y los enrejados permiten que el aire frío entre en la vivienda

La meta principal en las regiones calientes y húmedas es impedir que el sol golpee sobre la casa y disipar el incremento del calor (procedente de los utensilios humanos como la cocina). Así. Debemos proveer sombra a la casa y orientarla para que atrape las brisas frescas. Es importante encontrar los sitios en los cuales fluyen vientos moderados donde los bosques o valles profundos ayudan a dar sombra y a enfriar la casa.

En las áreas de vientos fuertes, encuentre sitios donde la estructura esté protegida de éstos vientos severos por medio del bosque, montículos o vegetación. Localice aquellos sitios donde la casa esté protegida de manera natural, como en los valles angostos donde cruzan los vientos.

La forma de la casa debe ser elongada e irregular para incrementar su superficie. No hay paredes sólidas ni aisladas que acumulan calor, en lugar de esto, las casas son frecuentemente de estilo abierto para ayudar a la circulación del aire. Si se usan paredes interiores éstas están hechas de materiales ligeros (como esteras, persianas, toldos) que no llegan hasta el techo para dar paso a un flujo libre de aire.

La ventilación es esencial y está dada a través de la ubicación de ventanas (con persianas verticales que actúan como succionadores de aire) y de rejillas de ventilación en el techo. Se puede añadir una casa de sombra en el lado sombreado de la casa e instalar rejillas de ventilación para establecer un flujo cruzado entre una rejilla del techo y una chimenea solar.

En la casa tropical existen barandillas anchas alrededor de la casa, las cuales sostienen frecuentemente viñas o enredaderas. En los subtrópicos la baranda se omite parcialmente del lado que mira el sol, para dejar que el sol del invierno penetre en la casa.

La vegetación da sombra a la casa; los árboles altos de troncos y ramas llanas (sin una ramificación densa) son particularmente útiles, como las palmeras que crecen más allá de la barandilla y sombrean el techo. Sin embargo, tenga cuidado de no cubrir completamente con plantas los alrededores de la casa, pues los bloques de vegetación densa bloquean las brisas frescas y elevan la humedad en los alrededores. Las áreas con hierba previenen más que las áreas con cemento la reflexión del calor hacia las paredes o los aleros.

Las fuentes de calor como las estufas y los sistemas de agua caliente están separados de la estructura principal, así, en los trópicos muchas casas tradicionales tienen cocinas en el interior para cocinar en el verano.

En las áreas con alta concentración de mosquitos e insectos nocivos, se instalan pantallas contra los insectos en todas las puertas y ventanas.

El techo está pintado de blanco y refleja la luz devolviendo el calor a la atmósfera. Los ángulos del techo son inclinados para que desague con las lluvias y para soportar los vientos fuertes. En las áreas donde la frecuencia de los huracanes es alta será necesario poner apuntalamientos cruzados muy fuertes en las paredes y cimientos profundos. Para proteger la casa se siembran grandes plantaciones de bambú (estos se doblan al contacto del viento sin quebrarse). Se plantarán de manera tal que enfrenten el viento.

A.5 La casa de los climas secos

Existen muchos diseños para casas ubicadas en las tierras secas, dependiendo de las temperaturas estacionales. Algunas áreas secas experimentan inviernos y veranos extremos, mientras que otras (cercanas a la línea Ecuatorial)

gozan de inviernos moderados.

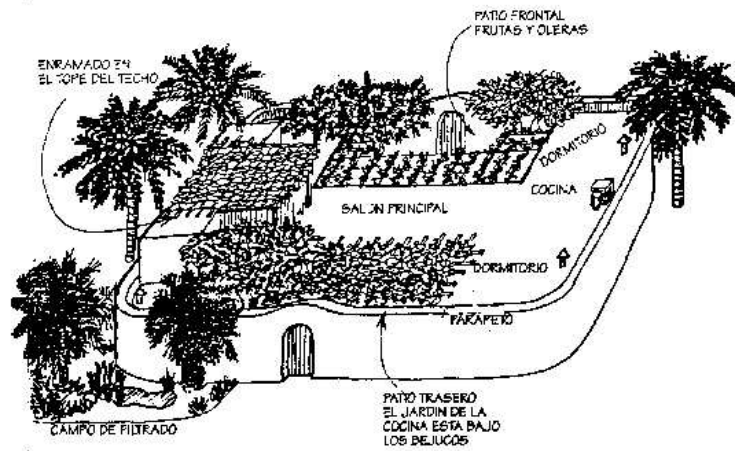


Figura A.9: La casa de clima seco seco tiene las paredes gruesas , jardines interiores y enrejados encima de las edificaciones.

El diseño básico de la casa del área templada se aplica, en cuanto a forma y orientación, para las regiones calientes y áridas con - inviernos fríos. Sin embargo, en estas últimas hay que hacer más énfasis en la provisión de fuentes de aire frío:

- **Patios interiores:** preferiblemente enrejados o sombreados encima por los árboles. Estos patios son más efectivos si están a dos o más pisos de altura y si son sombreados naturalmente por el edificio, aunque se pueden añadir patios pequeños con un toldo de sombra a las casas de un solo piso.
- **Enramados de bejuco:** completamente cercados con pisos de mulch e irrigación de goteo. Estos son aptos para las casas de un sólo piso. El enrejado necesita ser de aproximadamente el 30 % del área total de la casa para proveer aire fresco; las plantas caseras colgadas ayudan a refrescar el ambiente como también lo hace un tanque con agua.
- **Túnel de tierra:** una tunel de 20 metros de largo y un metro de profundidad que desciende colina abajo hacia la casa. Dentro del túnel, se pueden alimentar por goteo ollas de barro no cocido llenas de agua, cazuelas de carbón mojado para proveer una evaporación refrescante.

El aire fresco y húmedo correrá a través de éstos túneles hasta los cuartos de la casa.

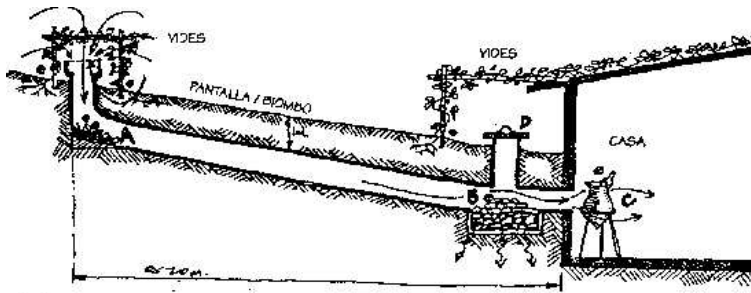


Figura A.10: El túnel de tierra provee de aire fresco húmedo a las casas de los desiertos. La pendiente del túnel baja hacia la casa, es sombreada en su apertura al exterior, tiene una cama húmeda compuesta de ceniza gruesa (B) y una vasija con agua en la salida del aire.

- **Ventilación cruzada inducida:** Esto se logra más fácilmente si se ubica una chimenea solar con una lámina de metal negra que se abre desde techo. Mientras se calientan, succionan el aire hacia los cuartos desde cualquiera de las fuentes de aire frío arriba mencionadas y crean un flujo de aire fresco en las áreas de vivienda.

Para el control del calor y el frío, se enuncian a continuación técnicas para moderar las temperaturas extremas diarias y estacionales que son típicas de muchas áreas desiertas: las paredes gruesas, los pisos aislados en los bordes, las puertas y ventanas bien cerradas contra los vientos, los cielos rasos aislados la eficiente ventilación cruzada. Las paredes exteriores pintadas de blanco ayudan a reflejar el calor excesivo y los árboles de sombra bien ubicados, las palmas, los enrejados de bejucos, los estanques o fuentes en el patio ayudan en el amortiguamiento del calor extremo.

Como en los climas tropicales una característica del diseño que ahorra energía es el localizar una cocina de verano en el exterior con biombos con parte del techo bajo un área enrejada que sostiene bejucos densos, donde los ocupantes puedan pasar la mayoría del día.

En muchas áreas de tierras secas, los techos son planos y contienen muchas de las características encontradas usualmente alrededor de la casa de las áreas templadas o tropicales.

Estas características incluyen tanques altos que contienen una provisión de agua para por lo menos para una a dos semanas; un área de lavado y secado de ropa (líneas para extender la ropa); palomares para recoger huevos, el estiércol, áreas planas para secar granos y vegetales, áreas para sentarse en la tarde, y plantas en macetas.

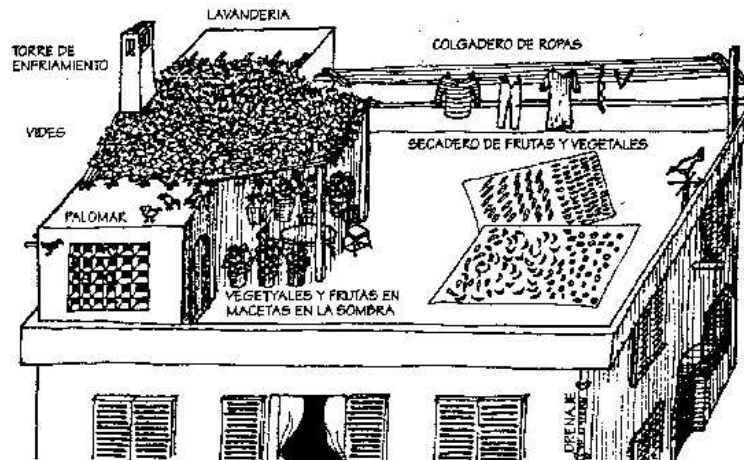


Figura A.11: "Instalaciones" en el techo en los climas secos-calientes. Muchas funciones del patio se dan en el techo.

En las áreas desérticas es de particular importancia el conservar un contenedor agua de uso doméstico. Un uso modesto del agua se obtiene fácilmente si el chorro de la ducha es usado para el lavado y tanto el agua de la ducha como la del lavamanos o de la lavandería se desvía primero al tanque de flujo del sanitario (si se proveen líneas de alcantarillado), o hacia el jardín. Para llevar el agua de la ducha a un sanitario de cisterna, la ducha y el lavamanos deben estar elevados unos centímetros arriba del nivel del piso debe usarse una cisterna a un nivel el más bajo.

Todas las áreas del techo deben recoger el agua dentro de tanques de almacenamiento, los cuales se localizan en el sitio sombreado de la casa bajo los enrejados, para proveer agua potable.

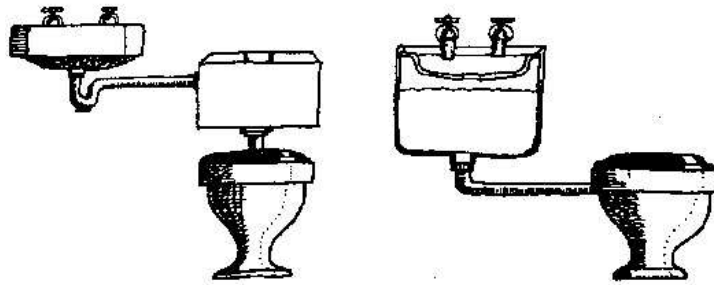


Figura A.12: Maneras de redirigir el agua a los sanitarios

A.6 Casas subterráneas

En los tiempos antiguos y modernos las cuevas y casas bajo el nivel de la tierra fueron las residencias preferidas en los desiertos (particularmente en aquellos con inviernos moderados). La viabilidad de éste tipo de construcciones depende de si la localización es en un suelo de roca blanda, o en un estrato suave bajo un techo de cal-creta o ferri-creta. Las casas cuevas pueden estar totalmente bajo el suelo, con tragaluces, pero son construidas comúnmente con una pared que mira hacia fuera del lado abierto de una colina (el lado sombreado).

Las fachadas decorativas pueden construirse en la entrada y suelen estar sombreadas por enrejados que soportan vides. En los lugares donde se esperan lluvias ocasionales las secciones de la ladera de la colina que están sobre la cueva deben estar selladas con cemento para semejar un techo o un área de escorrentía hacia las cisternas de agua; esto también fortalece el estrato que está arriba de los cuartos e impide que el agua se cuele dentro de la cueva.

Una casa fresca para los desiertos, y que duplica las condiciones de la cueva. es la vivienda que tiene montículos de tierra construidos hasta los aleros.

Las condiciones frescas de las cuevas, los tanques de ladrillo, los refugios contra el fuego y los sótanos para raíces ofrecen una gran ventaja en el almacenaje y preservación de una gran variedad de productos. Las cuevas frescas prolongan por bastante tiempo la vida de los cítricos, las cosechas de tubérculos y de hojas que se almacenan y son fuente de aire fresco en el verano.

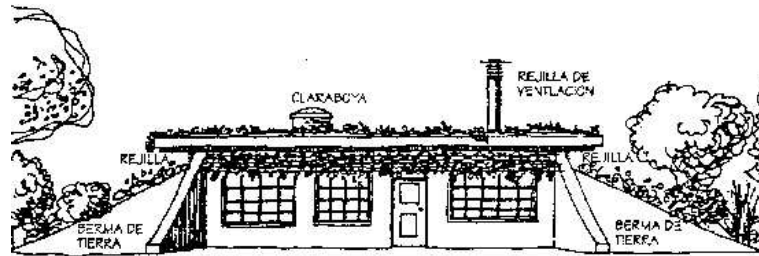


Figura A.13: Las casas en terraplenes en los climas áridos mantienen la casa aislada y fresca. Los bejucos pueden dar sombra a las paredes que miran al sol.

También una cueva cerca de la casa tiene valor como refugio familiar en casos de catástrofes como viento, fuego o sequía. Tales estructuras pueden excavar en los montículos adyacentes. También es posible construir los sótanos bajo el suelo con una entrada desde el piso (como trampas) o con compuertas fuera de él, o estructuras de acero envarillado o tubos cubiertos de tierra por encima del nivel del suelo.

A.7 Casas construidas con plantas

Hay varios grados de integración de la casa y las plantas: desde la casa elaborada totalmente con vegetación a la estructura convencional de cubrir el techo con viñas o césped.

En Alemania, Rudolf Doemach, ha diseñado una casa con un acero ligero y bastidores de madera. Esta casa, esta cubierta con plantas siempre verdes, viñas trepadoras con hojas coriáceas (algunas especies de hiedra, geranios y trepadoras de la costa se ajustan a ésta descripción). Solamente las puertas y las ventanas están sin bejucos y, como la estructura está diseñada para sostener las enredaderas no es necesaria la poda. El edificio tiene la forma de un iglú adaptado para los inviernos fríos.

A principios del siglo los colonos del área árida en el occidente en Australia construyeron una estructura exterior sobre las estructuras de cinc o hierro laminado. Sobre esta estructura guiaron plantas trepadoras, esta estructura de edificación fue cubierta completamente por vegetación y sirve para moderar el frío o el calor extremos.

Esta técnica también puede usarse en cualquier zona climática si se escogen las especies trepadoras apropiadas. En las áreas con temperaturas moderadas, pueden usarse algunos bejucos como:

- **Viñas deciduas de crecimiento rápido:** fruta de kiwi, *Campsis grandiflora*, *Louicera caprifolium*, *Mandevilla laxa* (Jazmín de Chile), *Parthenocissus quinquefolia* (trepadora de Virginia), uvas, *Wisteria*.
- **Trepadoras con frutos comestibles:** fruta de Kiwi, maracuyá (la *Passiflora mollissima* soporta las heladas ligeras), vides.
- **Enredaderas trepadoras en ladrillos y piedras:** viñas de cruz (*Bignonia capreolata*), uña de gato (*Dexantha unguis-cati*), *Ficus* trepador (*Ficus pumila*), hiedra inglesa o variegada (*Hedera helix* y *H. corymbosa* respectivamente), *Phaedranthus buccinatorius* (Trompeta de sangre mexicana).

A.7.1 Techos de cesp ed

Estos son otros sistemas casa/planta y pueden construirse en viviendas nuevas o pueden instalarse sobre estructuras fuertes ya existentes usando una película de plástico engranado en la base para hacer una barrera contra la humedad. Durante los tiempos húmedos se dirige agua hacia el canal mientras las hojas caen al suelo.

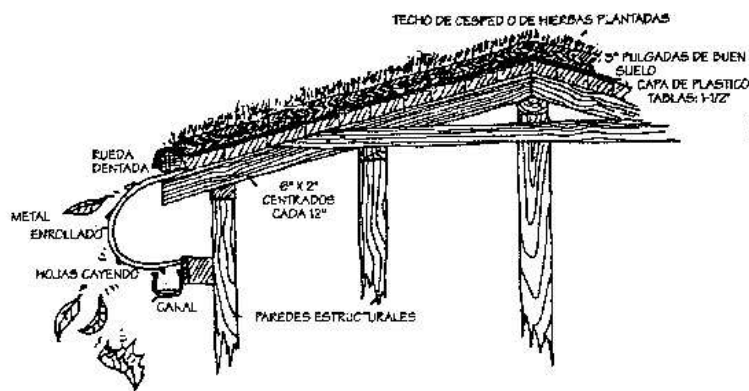


Figura A.14: Construcción de techos de cesp ed.

Probablemente la mejor manera para aprender la técnica y el conocimiento de las especies para ser usadas es comenzar haciendo pruebas en techos muy pequeños (garajes y establos). Debido a que la carga en el techo en el invierno es grande la estructura debe calcularse cuidadosamente.

Los techos de hierba/tierra son grandes aisladores activos, cualquier techo fuerte o reforzado puede sostener éste tipo de sistemas, ya sea como césped enrollado en las áreas húmedas, con agaves en las áreas secas y con margaritas, bulbos y, hierbas en otros lugares.

La evapotranspiración, más el riego regulado, mantienen el calor del verano fuera de la casa. En invierno, el aire y el follaje mantienen el frío invernal en el exterior. Los techos de césped/tierra actúan, en efecto, como la hiedra ubicada en las paredes. Ambos sistemas disminuyen el riesgo de fuego en la casa.

En los techos débiles ya existentes, especialmente aquellos revestidos con láminas de zinc o aluminio, se pueden colocar hiedras o viñas de poco peso, estas sirven como un aislamiento ligero si se adapta un canal similar a la que se muestra para los techos de césped.

A.8 Recursos procedentes de los desechos de la casa

Los "productos de desecho" de una casa son vistos frecuentemente más como un problema que como un recurso. Estos recursos procedentes de desechos son el agua de las duchas, pilas, la lavandería, alcantarillado, aguas residuales; residuos de comida, papel, vidrio, metal y plástico.

El vidrio y el metal pueden ser reciclados, mientras que los plásticos deben mantenerse en una cantidad mínima si usted lleva sus propias bolsas al mercado; los periódicos y papeles de la oficina se usan como una barrera de mulch en los jardines y huertos frutales y sí se mojan alimentan lombrices.

Los productos más importantes son el agua potable y el agua residual y estas se tratan de manera diferente de acuerdo al clima y preferencia. En las estaciones secas o en las tierras secas, donde el agua es muy importante, el agua procedente de las pilas y las duchas se desvía hacia una trampa de grasa

y desde allí es usada para regar los bancales del jardín. El agua del lavamanos puede usarse también para llenar cisternas de los sanitarios cumpliendo así una tarea doble. Toda el agua del techo es desviada cuidadosamente hacia los tanques de almacenamiento.

En los trópicos donde son frecuentes las lluvias fuertes en el verano y donde los tanques de almacenamiento se llenan fácilmente el agua de los techos debe ser desviada afuera de la casa al huerto hasta los canales de grava y las zanjas plantadas para prevenir la erosión en los caminos de acceso a la casa, al huerto y a los alrededores de la casa. Durante la estación seca, cuando la lluvia no es muy frecuente, las canales del techo conducen el agua hacia los tanques de almacenamiento para tener agua potable.

El desagüe de un sanitario de cisterna puede ser conducido a un tanque séptico o generador de metano para los sistemas de plantas (cultivos de huertos frutales). El abono procedente de las letrinas se entierra bajo los arboles; o en el caso de las letrinas móviles un árbol puede plantarse sobre una letrina ya usada.

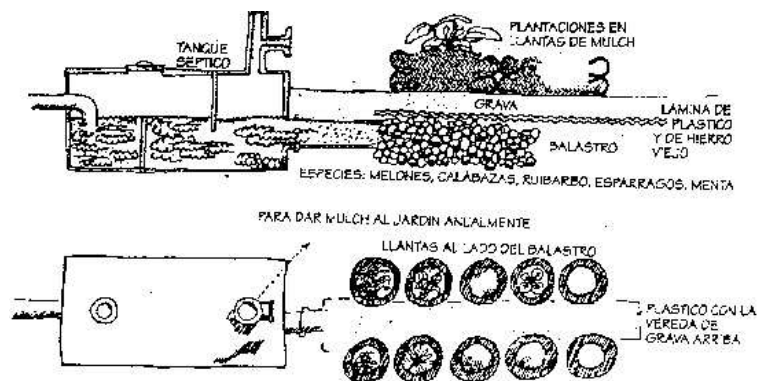


Figura A.15: Disposición del contenido de un tanque séptico a través de una línea de llantas

Los desechos de alimentos se dan a los animales (incluyendo a las lombrices de tierra) y el estiércol de los animales se usa en el jardín. Alternativamente, los desechos pueden reunirse para hacer abono o pueden enterrarse directamente en los bancales del jardín. Tenga cuidado de no plantar inmediatamente en el área donde entierra los desechos, pues éstos se elevan su temperatura al descomponerse. De ésta manera los productos procedentes de los desechos de la casa se usan en el sistema para producir alimentos y

nutrientes para los animales y las plantas.

A.9 Estrategias tecnológicas en “Permacultura”

Las categorías generales para la conservación de energía tecnológica en el hogar pueden resumirse de la siguiente manera:

Control climático: calentamiento, enfriamiento del espacio.

- Hornillos para quemar leña: los que arden rápido, son calentadores radiantes masivos, los que arden lento son estufas eficientes de hierro forjado.
- Invernadero anexo a la casa para brindar calor en el invierno.
- Casa de sombra anexa a la casa principal para enfriarla en el verano.
- Sistemas de enrejados para la desviación de los rayos del sol.
- Calor de conducción. Usualmente son sistemas grandes situados bajo el piso que usan tubos con agua o cables eléctricos conectados a una fuente que pierde calor.

Cocina y estufas de leña

- Las estufas de leña (mejores en climas templados, fríos) proveen de calor mientras se cocina.
- Las estufas de gas/propano son aptas para climas caliente y calientes/húmedos. Un sistema de gas deja abierto el potencial para usar el metano procedente de biodigestores que utilizan desechos orgánicos.
- Las unidades de cocina solar están divididas en dos tipos: arcos reflectivos parabólicos que se enfocan en un punto y hornos solares los cuales son cajas aisladas con vidrio en el frente y están revestidas de estaño aluminizado reflectivo. Ambos tipos de cocinas solares tienen que orientarse manualmente para seguir la dirección de la luz solar a menos que se adecúen con un aparato que siga la dirección del sol.

- El contenedor aislado para cocinar, éste es un método efectivo para artículos que necesitan un tiempo de cocimiento largo. Esencialmente, se hierve una olla (de estofado. verduras. frijoles. sopa) por 1-3 minutos. Luego la olla caliente y su contenido se transfiere inmediatamente a la caja aislada donde continúa cocinándose.



Figura A.16: Cocina solar

Provisión de agua caliente.

- Las estufas que funcionan con leña o las de calefacción, que tienen un tubo de 18 cms de cobre o acero inoxidable en forma de aro en el interior (en el fondo o en un lado) para proveer calor a un tanque aislado que almacena agua.
- Los colectores de luz solar para el techo pueden ser comprados en el comercio o hechos a mano.

Electricidad y alumbrado

- Para el alumbrado y los electrodomésticos se usan las células FV y baterías de almacenamiento.
- El viento o las mini-hidroeléctricas pueden proveen energía para todas las necesidades de alumbrado y de los electrodomésticos.
- Las bombillas que conservan energía y de larga duración como las lámparas de sodio de baja presión, se recomiendan para los cuartos que tienen un uso constante (cocinas).
- El alumbrado de gas y queroseno son útiles para la gente del campo que no necesita mucha luz o que no tienen los fondos para adquirir sistemas más caros.

Lavado y Secado de ropas.

- En Australia y en Europa, las lavadoras de presión operadas manualmente (de las marcas comerciales Jordache, Bamix, Presawash) funcionan por la presión del agua que llega a través de una manguera, éstas lavadoras tienen poca capacidad y, son aptas para una sola persona o una pareja.
- Para familias más grandes y comunidades, una máquina lavadora operada con monedas y compartida con otras personas ayuda a ahorrar dinero.
- Las ropas pueden secarse en una cuerda (tendedero), dentro de un invernadero o en un área similar aireada y con techo; los artículos pequeños pueden secarse en una bodega aislada alrededor de un cilindro de agua caliente que no está aislado. En las regiones templadas húmedas es tradicional el instalar un tendedero sobre la estufa de leña para secar las ropas en otoño, el tendedero se utiliza para secar hierbas, flores o mazorcas.

Secado, Refrigeración v enfriamiento de alimentos.

- Los refrigeradores de gas y queroseno están disponibles y son usualmente pequeños y eficientes.
- En las áreas templadas, un aparador ventilado abierto en uno de sus lados anexo a la casa de sombra puede utilizarse para almacenar frutas y vegetales, huevos y cualquier otro artículo que no requiera de una refrigeración extrema.
- En verano, un secador solar de alimentos o un invernadero semivaciado pueden hacer la tarea de secar las frutas y, los vegetales.

Conservación de agua

- Un tanque de agua, en el techo del granero o del garaje se ubica idealmente en la zona arriba de la casa para tener agua con energía potencial.
- El agua del lavamanos se usa en los sanitarios de cisterna o el agua de desecho del lavamanos y la ducha se desvía al huerto/invernadero.
- Las boquillas de las duchas que usan poca agua están disponibles a nivel comercial.

- Los sanitarios que tienen dos sistemas de chorro de limpieza (11 litros para sólidos, 5.5 litros para líquidos) se usan ahora en muchas de las casas nuevas en Australia y en algunos países de Europa.
- Las letrinas composteras no necesitan agua y proveen estiércol como abono para usarlo alrededor de árboles y arbustos.