

7. Implementación en TRNSYS

7.1. Introducción

El objetivo del presente proyecto es el diseño de una instalación de micro-cogeneración mediante motores de gas natural con el propósito de abastecer un edificio de viviendas tanto de la electricidad como de la calefacción y refrigeración que demanda, haciendo las simulaciones para distintas zonas climáticas.

Para ello, se adoptaron una serie de soluciones de diseño antes de proceder a su implementación en TRNSYS. Las más importantes son:

- La electricidad será producida por motores de gas natural que funcionarán en paralelo. Un controlador decidirá, en función de la demanda eléctrica, cuantos de dichos motores estarán funcionando. En determinadas condiciones, como se comentará más adelante, se extraerá energía de la red eléctrica.
- También habrá aporte de energía eléctrica a través de una serie de paneles fotovoltaicos, que cubrirán parte de la demanda para reducir la necesidad de producción de los motores de gas natural.
- La demanda de refrigeración se va a satisfacer mediante una enfriadora de agua condensada por aire, cuya capacidad frigorífica ha sido dimensionada según la zona climática.
- Para el Agua Caliente Sanitaria, se ha previsto la inclusión de una instalación de paneles solares térmicos con sus correspondientes elementos, que contribuirán a reducir la carga de la caldera de ACS.
- Para cubrir la demanda de calefacción, se ha procedido al diseño de un sistema de cogeneración, mediante el cual se aprovechará la energía térmica residual de los motores de gas natural usados para la producción eléctrica del edificio. Se incluirá a su vez una caldera auxiliar dimensionada según la zona climática, y capaz de satisfacer la demanda de forma autónoma en caso de no haber aprovechamiento del calor residual de los motores.

A continuación, vamos a proceder a explicar de forma más detallada cómo se ha diseñado la instalación en TRNSYS, y como se han confeccionado los archivos necesarios de climatología, demandas, etc.

7.2. Climatología y demandas

7.2.1. Temperatura ambiente y radiación

Para el presente proyecto, se han proporcionado los datos del clima para las zonas climáticas A3, B4, C2, D3 y E1. Posteriormente, a dichos datos se les ha dado el formato adecuado para su utilización en TRNSYS, en archivos .txt cuya primera línea es la nomenclatura de cada variable.

Los valores proporcionados son horarios a lo largo de todo el año, e incluyen la siguiente información:

- Temperatura ambiente
- Temperatura del cielo
- Radiación directa.
- Radiación difusa.
- Radiación global.
- Ángulo de inclinación de la radiación directa.

ta[i]	tc[i]	rD[i]	rd[i]	rG[i]	angle
0	0	0	0	0	0.00
14.444445	-3.423225	0	0	0	0.00
16.666666	-1.448931	0	0	0	0.00
16.111111	-3.045583	0	0	0	0.00
15.555555	-2.450391	0	0	0	0.00
15	-3.982463	0	0	0	0.00
14.444445	-3.423225	0	0	0	0.00
13.888889	-4.884037	0	0	0	0.00
13.888889	-4.884037	0	0	9.463772	9.463772
15	-3.982463	0	88.328545	88.328545	63.89
16.111111	-1.152402	88.042542	135.933395	223.975937	50.98
17.777779	-0.416375	126.43058	189.028503	315.459083	39.24
18.888889	0.648957	222.189362	181.598267	403.787629	30.12
20	-1.33782	313.311676	125.176453	438.488129	26.49
20.555555	1.148795	300.199066	106.743134	406.9422	30.42
20.555555	3.150123	201.247604	107.902298	309.149902	39.71
20	1.747651	112.715523	76.559929	189.275452	51.52
19.444445	0.02814	41.332272	24.914135	66.246407	64.45
18.888889	0.648957	0	6.309182	6.309182	0.00
18.333334	-1.043882	0	0	0	0.00
17.777779	-0.416375	0	0	0	0.00
17.222221	-2.067578	0	0	0	0.00
16.666666	-1.448931	0	0	0	0.00
16.111111	-3.045583	0	0	0	0.00
15.555555	-2.450391	0	0	0	0.00

Figura 7.1: Archivo .txt con datos de radiación para su uso en TRNSYS.

7.2.2. Temperaturas de agua fría

Para el diseño de la instalación, es necesario conocer las temperaturas del agua de la red durante los distintos meses del año para cada zona climática. Los valores proporcionados han sido mensuales, por lo que se han tratado los archivos de datos de forma que mostraran valores horarios y no mensuales para cada una de las zonas.

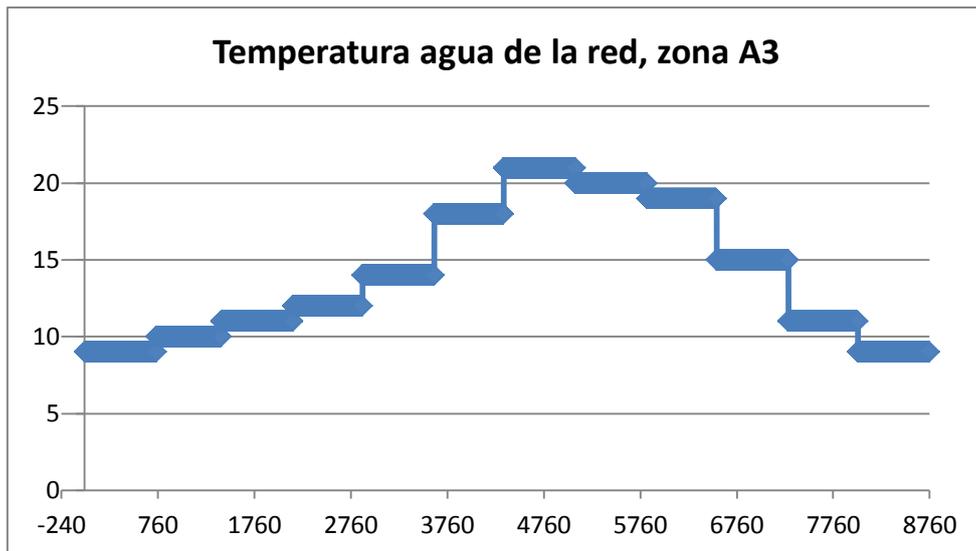


Figura 7.2: Temperatura del agua de la red durante cada hora del año.

7.2.3. Demanda eléctrica del edificio

En el caso de la demanda del edificio, no existen en la actualidad datos claros sobre los perfiles de consumo de una vivienda. Tras estudiar la información disponible, se optó por confeccionar los datos a través de la siguiente gráfica, obtenida del proyecto “Eureco”:

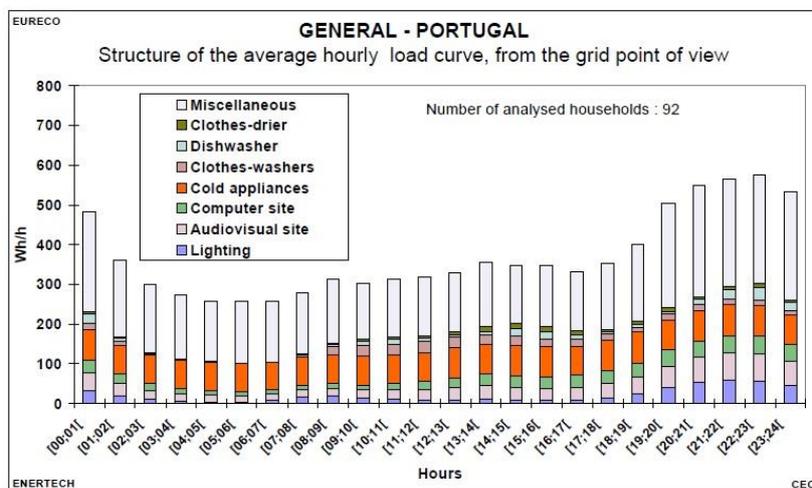


Figura 7.3: Perfil del consumo eléctrico en una vivienda en Portugal según las horas del día.

En dicha gráfica, con datos para Portugal (el caso más parecido a España), se muestra el perfil horario de consumo eléctrico de una vivienda.

Por otro lado, en la gráfica siguiente se observa la variación del consumo eléctrico para cada mes del año entre las 19 y 20 horas:

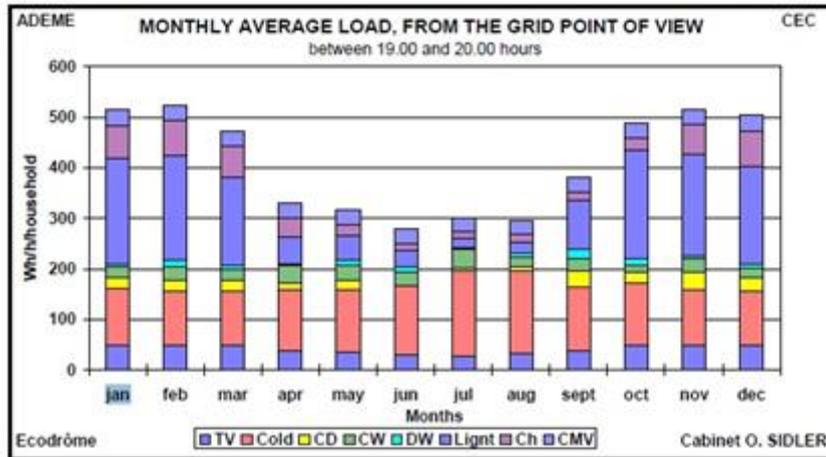


Figura 7.4: Demanda horaria media de energía entre las 19.00 y las 20.00 horas

En nuestro caso, y puesto que necesitamos valores horarios a lo largo del año, se han tratado los datos de forma que se han extraído los valores de la primera gráfica del consumo para cada hora del día, y posteriormente se han ponderado para cada mes, en función de los valores aportados por la segunda gráfica. El perfil resultante de cada mes puede observarse a continuación:

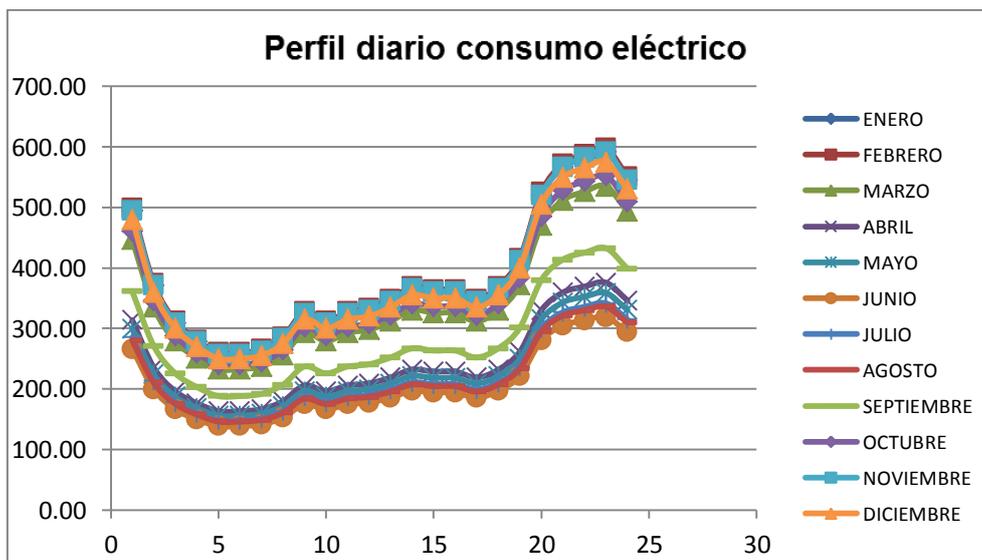


Figura 7.5: Perfil diario del consumo eléctrico por meses

Finalmente, se ha obtenido por lo tanto la distribución del consumo eléctrico (sin tener en cuenta consumos de calefacción ni refrigeración) para todo el año. Se muestra a continuación el perfil durante los 15 primeros días del año:

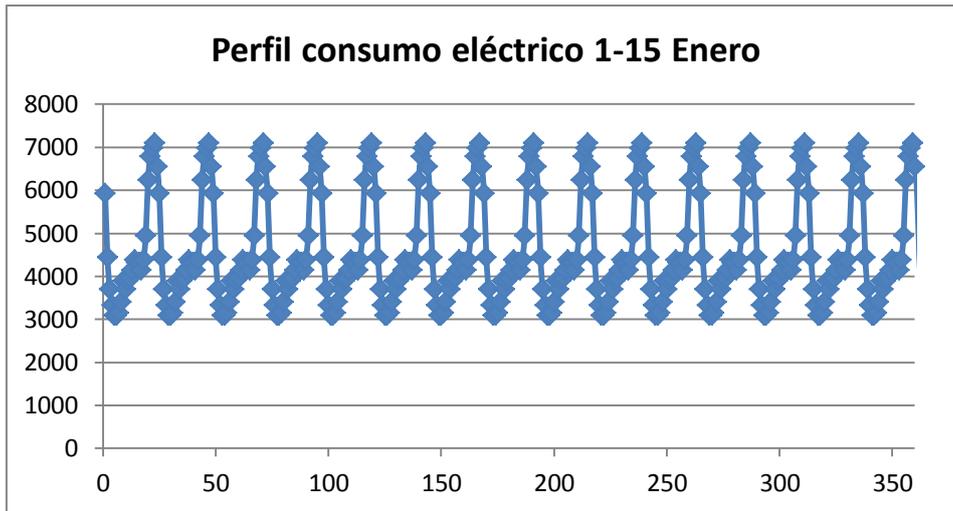


Figura 7.6: Perfil del 1 al 15 de Enero, hora a hora, del consumo eléctrico.

7.2.4. Demandas de calefacción y refrigeración

Las demandas tanto de calefacción como de refrigeración han sido proporcionadas para el edificio objeto del proyecto, y fueron calculadas a través del software LIDER para cada una de las zonas en que se divide el edificio. Una vez sumadas las cantidades, y separados los correspondientes a calefacción o refrigeración, se han obtenido los valores horarios totales.

El perfil obtenido para la zona A3, se muestra a modo de ejemplo:

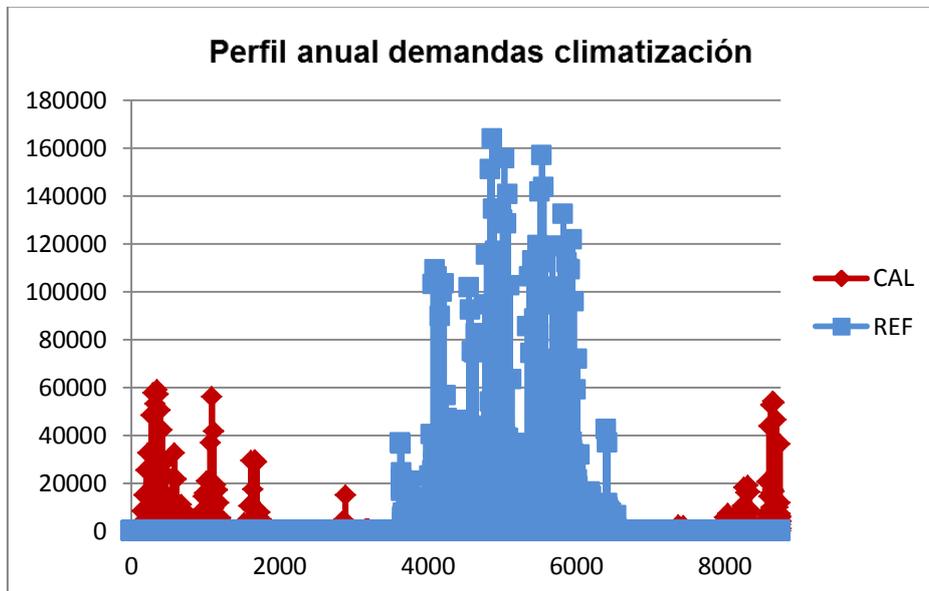


Figura 7.7: Perfil anual de las demandas de climatización.

7.2.5. Demandas de ACS

Para el cálculo de las demandas de Agua Caliente Sanitaria, son necesarios dos datos: la temperatura del agua de la red, y el caudal requerido para cada hora del año. Ya se ha mostrado cómo han sido obtenidos los datos de la temperatura de agua fría anteriormente.

Para saber cuál es el perfil del caudal de ACS demandado, hemos recurrido al documento de anexos del IDAE sobre “Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER”. En él, hemos accedido a los siguientes datos sobre el perfil de consumo de ACS:

Viviendas																									
Ventilación invierno ³	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Laboral, sábado y festivo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Agua Caliente Sanitaria (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Perfil Diario (% del Máximo)	12	5	4	2	2	6	27	100	70	75	62	56	48	48	41	33	39	38	52	70	57	63	48	52	

2 En régimen de verano, durante el periodo comprendido entre la 1 y las 8 horas, ambas incluidas, se supondrá que los espacios habitables de los edificios destinados a vivienda presentan una infiltración originada por la apertura de ventanas de 4 renovaciones por hora. El resto del tiempo, indicados con * en la tabla, el número de renovaciones hora será constante e igual al calculado según el procedimiento del apartado 4.7.4.

3 El número de renovaciones hora, indicado con * en la tabla, será constante e igual al calculado según el procedimiento del apartado 4.7.4.

Figura 7.8: Consumo horario de ACS durante las horas de un día tipo.

A través de una hoja Excel, se han hecho los cálculos necesarios para transformar dichos datos en caudal horario de demanda de ACS. Se han tenido en cuenta varios aspectos:

- Se han considerado 3 personas por cada 100 m² del edificio.
- Se ha considerado un consumo de 22 litros/(persona·día).

El perfil diario de consumo de ACS obtenido del edificio, y que se repetirá durante todos los días del año, es el siguiente:

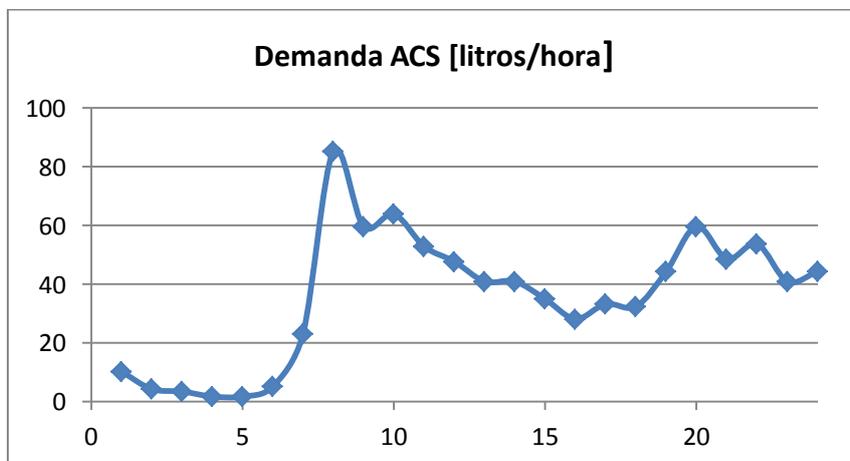


Figura 7.9: Demanda horaria de ACS durante las distintas horas de un día tipo.

7.3. Dimensionado de equipos

A la hora de diseñar una instalación en TRNSYS, es necesario conocer una serie de parámetros de los equipos, por lo que para poder proceder a implementar la instalación del presente proyecto es necesario acudir a los fabricantes de los distintos elementos, y obtener valores reales de todos los parámetros que serán necesarios durante el diseño.

7.3.1. Refrigeración: Enfriadoras

Para el dimensionado de las enfriadoras, hemos tenido en cuenta que existen grandes picos de demanda debido a los arranques. Por ello, para evitar un sobredimensionado de la instalación con todos los costes e inconvenientes que conlleva, se ha optado por dimensionar la potencia de la enfriadora para el 90% de la carga máxima anual, y sin tener en cuenta los arranques. Además, se ha previsto que la demanda de refrigeración se satisfaga sólo en situaciones donde la temperatura ambiente sea mayor de 25 °C.

Los valores de demanda de refrigeración varían entre las distintas zonas climáticas, por lo que la potencia de la maquina enfriadora deberá ser distinta en cada zona.

Puesto que necesitamos datos reales para implementar la instalación en TRNSYS, hemos optado por escoger las enfriadoras de la marca CARRIER, cuyos modelos tienen capacidades frigoríficas desde 17 a 240 kW.



Figura 7.10: Enfriadora Carrier.

Tras hacer los cálculos pertinentes, se detallan a continuación los modelos de enfriadora disponibles para cada zona climática.

ZONA CLIMÁTICA	MODELO CARRIER	POTENCIA NOMINAL [kW]	EER NOMINAL
A3	040	39,4	2,91
B4	070	67	3,48
C2	040	39,4	2,91
D3	060	57	3,55
E1	033	31	2,33

Tabla 7.1: Datos técnicos de la enfriadora Carrier cuyo modelo se indica en la segunda columna

7.3.1.1. Variación por la temperatura ambiente

Por otro lado, hemos querido tener en cuenta que tanto la potencia como la eficiencia dependen de la temperatura ambiente, puesto que el equipo va a condensar por aire. Para corregir el funcionamiento de la enfriadora, se han empleado las curvas usadas para dicha corrección por el software CALENER GT, para obtener los valores de los coeficientes que harán variar la capacidad de enfriamiento y el EER de la enfriadora. La temperatura del agua a la salida del evaporador se va a considerar constante e igual a 7 °C, por lo que el único parámetro que va a variar es la temperatura de entrada al condensador.

La variación de la capacidad de enfriamiento de la máquina se obtiene según la ecuación:

$$f(T_1, T_2) = a_0 + a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot (T_1)^2 + a_3 \cdot T_2 + a_4 \cdot (T_2)^2 + a_5 \cdot T_1 \cdot T_2$$

Donde T_1 es la temperatura del evaporador y T_2 es la temperatura de entrada al condensador, medidas en grados Fahrenheit. Los coeficientes necesarios y resultados obtenidos son los siguientes:

T_1 (°F)	44.6
a_0	0.813499
a_1	0.011955
a_2	0.000115
a_3	-0.004194
a_4	0.000003
a_5	-0.000046

T ₂ (°C)	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47
Factor	1.164	1.133	1.101	1.070	1.039	1.009	0.978	0.948	0.918	0.887

Una vez obtenidos los coeficientes correspondientes a cada valor de temperatura ambiente, posteriormente se transforman al formato requerido por TRNSYS para su correcta utilización.

La corrección del EER por cambios en la temperatura ambiente se ha hecho de forma análoga:

T ₁ (°F)	44.6
a ₀	0.631347
a ₁	-0.009002
a ₂	0.000109
a ₃	0.004651
a ₄	0.000058
a ₅	-0.000097

T ₂ (°C)	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47
Factor	0.7369	0.7829	0.8324	0.8852	0.9414	1.0009	1.0639	1.1302	1.1999	1.2731

7.3.1.2. Variación por el factor de carga parcial

Otra de las razones por las que puede variar el desempeño de una maquina enfriadora, es por no trabajar a plena carga. Por eso, se hace necesario tener también en cuenta ésta posibilidad. Para ello volvemos a recurrir a las curvas suministradas por CALENER GT para calcular los coeficientes de corrección:

$$f(r) = b_0 + b_1r + b_2r^2 + b_3r^3.$$

Donde r es el factor de carga parcial, cociente entre la demanda de refrigeración en ese instante y la potencia frigorífica que puede dar la máquina. Los coeficientes proporcionados por las tablas y los factores calculados son los siguientes:

b_0	0.088065
b_1	1.137742
b_2	-0.22581
b_3	0

Factor	0.088	0.200	0.307	0.409	0.507	0.600	0.689	0.774	0.854	0.929	1
fdp	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

7.3.2. Dimensionado parte fotovoltaica

Se ha considerado que una opción interesante sería la inclusión en la instalación de una serie de paneles fotovoltaicos que produzcan parte de la energía eléctrica necesaria en el edificio, que de otra forma sería producida por los motores de gas natural.

Para el dimensionamiento tanto de los paneles fotovoltaicos como del inversor se ha procedido de la siguiente forma.

7.3.2.1. Dimensionado de los paneles

En primer lugar, hemos procedido a elegir los paneles fotovoltaicos que se van a usar en la instalación, pues es necesario conocer sus parámetros para poder simularlos en TRNSYS. El modelo elegido es el Isofotón ISF-250 P.



Figura 7.11: Panel fotovoltaico Isofotón modelo ISF-250 P.

Se trata de un módulo de silicio monocristalino de 250 vatios de potencia nominal. Algunas de sus características se detallan a continuación:

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Comportamiento en STC: Irradiancia 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C, AM 1,5

	ISF - 240 P	ISF - 245 P	ISF - 250 P
Potencia nominal (Pmax)	240 W	245 W	250 W
Tensión en circuito abierto (Voc)	37,3 V	37,4 V	37,6 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8,61 A	8,73 A	8,85 A
Tensión en el punto de máxima potencia (Vmax)	30,1 V	30,3 V	30,4 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	8,00 A	8,14 A	8,27 A
Eficiencia	14,5%	14,8%	15,1%
Tolerancia de potencia (% Pmax)	0/+3%	0/+3%	0/+3%

Figura 7.12: Tabla con datos técnicos de algunos paneles fotovoltaicos Isofotón.

Se ha optado por emplear en la instalación un inversor con seguidor del punto de máxima potencia. Por ello, el número de paneles en serie y paralelo debe elegirse de forma que se trabaje en el rango de tensiones de salida adecuado para el inversor.

La potencia de dicho inversor dependerá de la potencia del campo solar. Además, los diferentes modelos consultados, de la marca “Sunny Boy”, trabajan para seguir el punto de máxima potencia en el rango de tensiones de 175 a 500 voltios. Por lo tanto, intentaremos dimensionar el campo fotovoltaico de forma que las tensiones máximas y mínimas alcanzables estén dentro de dicho rango. A su vez, deberá de tenerse en cuenta la intensidad máxima capaz de soportar el inversor (15 Amperios para todos los modelos).



Figura 7.13: Inversor “Sunny Boy”

La tensión que puede alcanzar un panel fotovoltaico está influenciada por la temperatura ambiente. Por ello, dimensionaremos el campo fotovoltaico teniendo este factor en cuenta.

A modo de ejemplo, se incluyen los cálculos realizados para la zona A3.

Cálculo de la temperatura máxima y mínima de un panel:

$$T_{MAX_panel} = T_{amb-max} + \frac{TONC - 20}{800} \cdot I$$

Donde $T_{amb-max}$ es la temperatura ambiente máxima, $TONC=45$ (es la temperatura nominal de operación e las células, dato del fabricante) e $I=1000$.

$$T_{MIN_panel} = T_{amb-min} + \frac{TONC - 20}{800} \cdot I$$

Donde $T_{amb-min}$ es la temperatura ambiente mínima, e $I=100$.

T_{max_A3}	38.33 °C
T_{min_A3}	1.11 °C
T_{max_panel}	69.583 °C
T_{min_panel}	4.236 °C

Cálculo de las tensiones máximas y mínimas de un panel:

$$V_{max\ p} = V_{mp} + \frac{\partial V_{mp}}{\partial T} \cdot (T_{MIN_panel} - 25) ; V_{min\ p} = V_{mp} + \frac{\partial V_{mp}}{\partial T} \cdot (T_{MAX_panel} - 25)$$

Donde V_{mp} es la tensión de máxima potencia del panel y el término $\frac{\partial V_{mp}}{\partial T} = -0.12558$ es el coeficiente de variación con la temperatura, dados por el fabricante. Haciendo los cálculos:

V_{max_panel}	33.008 V
V_{min_panel}	24.801 V

Cálculo del número de paneles en serie y en paralelo:

$$Nps > \frac{V_{min\ mp}}{V_{min\ p}} ; Nps < \frac{V_{max\ mp}}{V_{max\ p}}$$

Donde $V_{minmp}=175$ V y $V_{maxmp}=500$ V (datos del inversor).

$Nps >$	8 paneles
$Nps <$	15 paneles

En caso de que no nos importara que el inversor no trabaje siguiendo al punto de máxima potencia, podríamos poner paneles en serie de forma que no superemos la tensión máxima admisible del inversor:

$$Nps_{max} = \frac{V_{max_{inv}}}{V_{max_{panel}}} = 22 \text{ paneles}$$

Por otro lado, debemos cumplir la siguiente condición para los paneles en paralelo:

$$Nhp \cdot I_{cc_{panel}} < I_{max_{inv}} \rightarrow Nhp \cdot 8,85 < 15 \rightarrow Nhp = 1$$

Por último:

$$Ntp = Nps \cdot Nhp$$

Luego como se ha visto, en la zona climática A3, el número total de paneles que se pueden poner, todos ellos conectados en serie, son 22 como máximo. Así mismo, si se quiere que el inversor sea capaz de seguir el punto de máxima potencia, el número de paneles deberá estar comprendido entre 8 y 15.

Los cálculos para el resto de zonas climáticas se han hecho de forma análoga.

7.3.2.2. Selección de inversor

Como ya hemos visto, las características de los diferentes modelos de inversor, de la marca "Sunny Boy", son bastante similares. El parámetro que varía principalmente es la Potencia máxima de CC, que deberá cumplir:

$$P_i \geq 0,8 \cdot P_{cs}$$

Por lo tanto, el inversor habrá que elegirlo en cada caso según la potencia del campo solar, que dependerá del número de paneles fotovoltaicos de la instalación, y que variará en las distintas simulaciones que se van a llevar a cabo mediante TRNSYS. Las características principales de los modelos de inversor son:

	Sunny Boy 3000TL	Sunny Boy 3600TL	Sunny Boy 4000TL	Sunny Boy 5000TL
Entrada (CC)				
Potencia máxima de CC (con $\cos \phi=1$)	3200 W	3880 W	4200 W	5250 W
Tensión de entrada máx.	750 V	750 V	750 V	750 V
Rango de tensión MPP/ tensión asignada de entrada	175 V – 500 V / 400 V	175 V – 440 V	175 V – 440 V	175 V – 500 V / 400 V
Tensión de entrada mín. / tensión de entrada de inicio	125 V / 150 V	125 V / 150 V	125 V / 150 V	125 V / 150 V
Corriente máx. de entrada / por String	15 A / 15 A	15 A / 15 A	15 A / 15 A	15 A / 15 A

Figura 7.14: Datos técnicos de algunos inversores “Sunny Boy”

7.3.2.3. Ángulos de inclinación de los paneles

Los paneles tendrán orientación sur, puesto que la cubierta del edificio permite que sean orientados de esa forma, que es la óptima.

La inclinación de los paneles será igual a la latitud de la localidad menos 10° , pues se considera que es el ángulo óptimo en fotovoltaica.

Por lo tanto, la inclinación de los paneles fotovoltaicos aproximada para las distintas zonas climáticas será:

A4	26°
B4	27°
C2	31°
D3	30°
E1	32°

7.3.3. Dimensionado de los motores de cogeneración

Como se ha mencionado anteriormente, y expuesto en la memoria descriptiva, para el presente proyecto se van a emplear motores de combustión interna de gas natural, que van a producir la energía suficiente para cubrir la demanda eléctrica del edificio, y la potencia eléctrica consumida por la enfriadora para refrigeración. Además, se va a aprovechar para calefacción la energía térmica residual de dichos motores a través de un intercambiador que aportará energía a un depósito de acumulación de agua. De esta forma obtenemos una instalación de micro-cogeneración, reduciendo la energía necesaria que deberá aportar la caldera auxiliar de calefacción.

Para disponer de los datos necesarios y proceder a su implementación en TRNSYS, se han elegido los motores. Se ha optado por emplear motores diseñados específicamente para micro-cogeneración, en concreto el modelo G 5.0 de la marca Dachs.



Figura 7.15: Modelo de exposición del motor Dachs en el Museo alemán de Obras Maestras de la Tecnología.

Estos motores permiten conectar varias unidades en paralelo, que es uno de los propósitos de este proyecto.

Sus características principales son las siguientes:

Datos técnicos - Dachs

Modelo	Dachs ¹⁾	G 5.5 estándar ⁴⁾	G 5.5 condensación ²⁾	G 5.0 Bajo NOx estándar ⁴⁾	G 5.0 Bajo NOx condensación ²⁾
Combustible		Gas natural		Gas natural	
Potencia eléctrica [kW] ³⁾		5,5		5,0	
Potencia térmica [kW]		12,5	14,8	12,3	14,6
Consumo de combustible [kW] ³⁾		20,5		19,6	
Consumo eléctrico [kW _{el}] ⁴⁾				0,12	
Temperatura de ida máx.				83 °C	
Temperatura de retorno máx.				70 °C	
Tensión / Frecuencia				3 ~ 230 V / 400 V 50 Hz	
Rendimientos:					
- Eléctrico		27%		26%	
- Térmico		61%	72%	63%	74%
- Global		88%	99%	89%	100%

Figura 7.16: Algunos datos técnicos del motor Dachs.

7.3.4. Paneles solares térmicos

Los captadores elegidos serán del modelo “Isotherm plus” de Isofotón, de 2.205 m² de superficie. Sus características son adecuadas para la instalación, y serán conectados en paralelo.



Figura 7.17: Captador solar térmico plano, modelo Isotherm Plus de Isofotón.

El fabricante recomienda que sean agrupados en baterías de 6 captadores como máximo, y en la documentación se indican los caudales recomendados de diseño del circuito:

Nº CAPTADORES	CAUDAL (l/h)	AREA (m ²)	DIAMETRO INTERIOR	
			TUBERIA (mm)	
1 - 7	110 - 770	2,2 - 15,4	22	
8 - 15	880 - 1650	17,6 - 33	28	
15 - 29	1760 - 3190	35,2 - 63,8	35	

El caudal de diseño medio recomendado es de $50 \frac{\text{litros}}{\text{hora} \cdot \text{m}^2}$.

7.3.5. Acumuladores de ACS y calefacción

Los depósitos de acumulación que van a ser empleados en la instalación son los indicados para este tipo de instalaciones. Van a tenerse en cuenta distintos tamaños, puesto que las simulaciones del proyecto se van a hacer teniendo en cuenta la variación de los volúmenes de acumulación. Se han escogido acumuladores de la marca “Thermor”.



Figura 7.18: Acumulador solar de la firma Thermor, modelo DS 1500.

Los distintos modelos disponibles y sus correspondientes volúmenes de acumulación son los que se detallan a continuación:

MODELO		DS 500	DS 750	DS 1000	DS 1500	DS 2000	DS 3000
Código		090617	090618	090619	090620	090621	090622
Capacidad	Litros	500	750	1000	1500	2000	3000
Presión máx servicio	bar	10	10	10	10	10	10
Temperatura máx servicio	°C	95	95	95	95	95	95

Figura 7.19: Datos técnicos de acumuladores Thermor, serie DS.

Por lo tanto, tendremos la posibilidad de realizar las simulaciones variando los volúmenes de los depósitos entre 500 litros y 3000 litros, que son los adecuados para este tipo de instalaciones.

7.3.6. Caldera de ACS

La caldera auxiliar de agua caliente sanitaria será la que existe en la instalación. Tiene una potencia de 24 kW y es más que suficiente para atender por sí misma la demanda de ACS del edificio. En base al caudal de consumo de ACS en litros/hora se precisaría una de menor potencia pero ello no reflejaría aquellas situaciones donde se consume dicho caudal en un menor período de tiempo, por lo que los picos de potencia requeridos serían mayores que los calculados.

7.3.7. Caldera de calefacción.

La caldera de calefacción estaba presente en la instalación y estaba dimensionada en base a la potencia máxima de calefacción demandada, pero sin tener en cuenta las horas de arranque. Para las distintas zonas climáticas, los resultados han sido los siguientes, indicándose la potencia de los equipos disponibles:

Zona Climática	Potencia Demandada	Potencia Instalada
A3	18475.38 W	20 kW
B4	21392.97 W	24 kW
C2	26342.09 W	30 kW
D3	30120.99 W	35 kW
E1	37321.25 W	40 kW

Tabla 7.2: Potencia de la caldera de calefacción para cada zona climática

7.3.8. Dimensionado de las bombas de circulación

La bomba elegida para la instalación, donde como se verá más adelante harán falta cuatro bombas, es la denominada "Wilo-Star-Z 20/1". Este modelo es capaz de trabajar para todo el rango de caudales que estará presente en los distintos puntos del sistema objeto de este proyecto, pues puede mover hasta 1500 litros/hora aproximadamente.

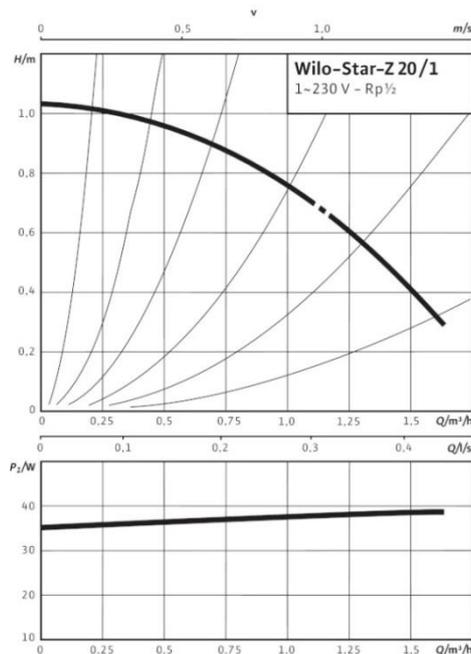


Figura 7.20: Curvas características de la bomba WILO-STAR Z 20/1.

Tiene un consumo de potencia entre 36-38 Watos, por lo que consideraremos un consumo medio de 37 Watos para cuando las bombas entren en funcionamiento.

7.4. Diseño de la instalación en TRNSYS

En esta sección se va a explicar cómo se han incluido todos los elementos necesarios para la simulación de la instalación en el caso que consta de motores de cogeneración, paneles fotovoltaicos y paneles térmicos, pues de las configuraciones a simular es la más completa tal y como se verá más adelante.

7.4.1. Subsistema eléctrico

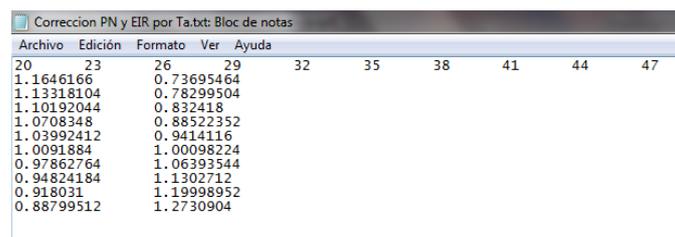
En primer lugar, se ha implementado en TRNSYS la parte eléctrica de la instalación. Como ya se ha mencionado anteriormente, los elementos a incluir son:

- Enfriadora para refrigeración
- Paneles fotovoltaicos
- Inversor
- Motores de gas natural
- Otros elementos adicionales necesarios para el tratamiento de los datos

7.4.1.1. Enfriadora

No existe en TRNSYS un componente (type en TRNSYS) que simule una enfriadora condensada por aire, por lo que se ha implementado a través de una serie de elementos.

En primer lugar usaremos un componente (type 42) que, tras leer en el archivo climatológico cuál es la temperatura ambiente, interpola entre los valores de la curva de variación de la potencia frigorífica y EER de la máquina que se explicó anteriormente, y cuyos valores han sido proporcionados en un archivo .txt que el type es capaz de leer.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
20	23	26	29	32
1.1646166		0.73695464		35
1.13318104		0.78299504		38
1.10192044		0.832418		41
1.0708348		0.88522352		44
1.03992412		0.9414116		47
1.0091884		1.00098224		
0.97862764		1.06393544		
0.94824184		1.1302712		
0.918031		1.19998952		
0.88799512		1.2730904		

Figura 7.21: Valores de corrección por temperatura ambiente de la enfriadora

De esta forma, tras leer la temperatura ambiente el type calcula los coeficientes a aplicar a la potencia nominal y el EER nominal de la máquina, para tener en cuenta la influencia de la temperatura en su funcionamiento.

Posteriormente, introducimos mediante la calculadora “Variación con Ta” los valores de la Potencia frigorífica nominal de la enfriadora, y su EER nominal, para calcular el valor resultante al tener en cuenta la variación de la temperatura ambiente a través de los coeficientes calculados en el paso anterior.

Por otro lado y de forma similar, será utilizado otro componente (type 43) que tendrá en cuenta la variación de la potencia frigorífica y el EER de la máquina en función del factor de carga parcial, calculado una vez es suministrado el valor de la demanda de refrigeración.

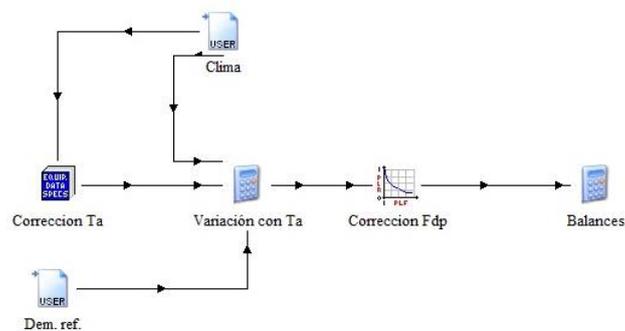


Figura 7.22: Diseño de la enfriadora en TRNSYS

Una vez tenidos en cuenta los efectos de la temperatura ambiente y el factor de carga parcial, obtenemos los valores de la potencia frigorífica real que puede suministrar la máquina, así como el consumo de potencia eléctrica necesario para ello. Ese será el valor utilizado para hacer posteriormente el balance eléctrico de la instalación.

7.4.1.2. Paneles fotovoltaicos

Una vez elegidos los paneles fotovoltaicos se ha buscado el componente adecuado, e introducido todos los datos de entrada necesarios, que son tanto climáticos como valores suministrados por el fabricante de los captadores.

Datos de temperatura ambiente y radiación:

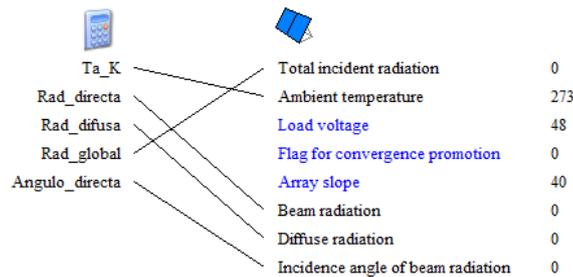


Figura 7.23: Datos de entrada para el sistema fotovoltaico en TRNSYS

Datos técnicos:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	☞	☞				Module short-circuit current at reference conditions
			8.85		amperes	More...
2	☞	☞				Module open-circuit voltage at reference conditions
			37.6		V	More...
3	☞	☞				Reference temperature
			298		K	More...
4	☞	☞				Reference insolation
			1000		W/m ²	More...
5	☞	☞				Module voltage at max power point and reference conditions
			30.4		V	More...
6	☞	☞				Module current at max power point and reference conditions
			8.27		amperes	More...
7	☞	☞				Temperature coefficient of Isc at (ref. cond)
			0.004248		any	More...
8	☞	☞				Temperature coefficient of Voc (ref. cond)
			-0.12558		any	More...

Figura 7.24: Datos técnicos de los paneles fotovoltaicos en TRNSYS

Además de los datos del fabricante, debemos indicar el valor de la inclinación de los paneles, así como el número de paneles en serie y paralelo.

7.4.1.3. Inversor

El componente del inversor es relativamente simple de implementar en TRNSYS, pues solo requiere conocer algún parámetro del fabricante, y su potencia nominal. Además, tendrá en cuenta la eficiencia del inversor para calcular la potencia de salida. Las salidas de los paneles fotovoltaicos serán conectadas a su entrada, y sus salidas al elemento que hará el balance eléctrico de la instalación.

7.4.1.4. Balance eléctrico

Una vez se conoce para cada instante cuál es la potencia eléctrica demandada en el edificio, la potencia de refrigeración requerida, el consumo de las bombas de la instalación y la producción fotovoltaica, es posible hacer un balance para saber cuál es la cantidad de energía que deberá ser suministrada por los motores de cogeneración de gas natural.

Un controlador será el que decida en cada momento cuantos motores deben estar funcionando en paralelo, cuidando de que no se trabaje bajo la potencia mínima o por encima de la máxima de dichos motores.

Sin embargo, vamos a tener en cuenta una serie de consideraciones:

-Cuando la potencia eléctrica requerida es menor que la potencia mínima que puede dar un motor, se obtendrá en su lugar la energía de la red eléctrica, para evitar poner en funcionamiento un motor que trabajaría a un rendimiento muy bajo.

-Si el último motor que entraría en funcionamiento en la instalación, lo hiciera solo durante muy pocas horas al año, se prescindirá de dicho motor y se extraerá la energía que produciría de la red eléctrica en su lugar, para evitar sobredimensionar la instalación.

-Se va a hacer el cálculo de la energía excedente que pueda haber en algún momento puntual gracias a la producción fotovoltaica, pero no se prevé su venta a la red eléctrica por los inconvenientes que ello conlleva, y porque las cantidades son muy bajas como para que sea rentable.

7.4.1.5. Motores de gas natural

El componente que se va a utilizar es el type 120. Inicialmente diseñado para simular un motor de generación diésel (DEGS), permite también cambiar el tipo de combustible a gas natural. Es un modelo basado en relaciones empíricas entre el consumo de combustible y la potencia eléctrica generada.

Como datos de entrada, el componente necesita conocer cuántos motores deberán de funcionar en cada instante, y la potencia que deberán de dar, que son datos suministrados por la herramienta de balance energético explicada en el apartado anterior.

Una vez hechos los cálculos, dicho componente nos proporcionará la información necesaria sobre el consumo de combustible (gas natural), la eficiencia del combustible y eficiencia eléctrica y el calor residual producido, que será posteriormente aprovechado en nuestro sistema de micro-cogeneración. En la imagen podemos ver los datos de salida que proporciona:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	PTOTAL	W			More...	<input type="checkbox"/>
2	V_LIQ	l/hr			More...	<input type="checkbox"/>
3	V_GAS	Nm ³ /h			More...	<input type="checkbox"/>
4	ETA_FUEL	kWh/L			More...	<input type="checkbox"/>
5	ETA_EL	-			More...	<input type="checkbox"/>
6	Q_WASTE	W			More...	<input type="checkbox"/>

Figura 7.25: Algunos datos de salida que proporciona TRNSYS sobre los motores

7.4.1.6. Esquema del subsistema eléctrico completo

El esquema eléctrico completo sin incluir determinados elementos que dificultan la visualización de la instalación, pero que son necesarios para que TRNSYS pueda hacer las simulaciones, es el siguiente:

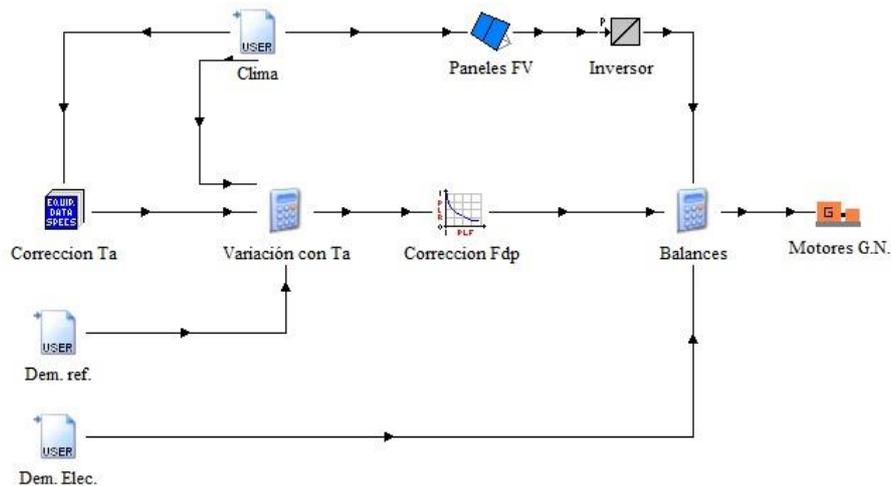


Figura 7.26: Subsistema eléctrico simplificado en TRNSYS

7.4.2. Subsistema térmico

La parte térmica de la instalación es la encargada de abastecer las necesidades de Agua Caliente Sanitaria y de calefacción, y consta de una serie de elementos que van a ser explicados a continuación.

7.4.2.1. Abastecimiento de ACS

7.4.2.1.1. Paneles solares térmicos

Su implementación se ha hecho de forma análoga a la de los paneles fotovoltaicos. Se ha utilizado el componente adecuado para simular paneles de cubierta plana (type 73). Es

necesario suministrar una serie de valores climáticos, y especificaciones técnicas indicadas por el fabricante de los captadores.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1		Number in series	1	-		More...
2		Collector area	39.69	m ²		More...
3		Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K		More...
4		Collector fin efficiency factor	0.7	-		More...
5		Bottom, edge loss coefficient	2.5	kJ/hr.m ² .K		More...
6		Absorber plate emittance	0.78	-		More...
7		Absorptance of absorber plate	0.95	-		More...
8		Number of covers	1	-		More...
9		Index of refraction of cover	1.526	-		More...

Figura 7.27: Parámetros de entrada para el sistema solar-térmico.

Además deberá indicarse el área total de colectores, que será variado durante las simulaciones de la instalación.

7.4.2.1.2. Intercambiador

Debido a que en este tipo de instalaciones suelen separarse el primario y el secundario de la instalación, puesto que como fluido de trabajo suele utilizarse una mezcla de agua y anticongelante, debe incluirse un intercambiador. En nuestro caso hemos optado por uno de eficiencia constante e igual a 0.8, que calcula la temperatura hacia el acumulador en función de los caudales y de la temperatura de salida de los captadores.

7.4.2.1.3. Acumulador ACS

El depósito de acumulación que se va a utilizar es un simple acumulador de agua (type 4) que estaba presente en la instalación, sin elementos auxiliares de calentamiento. Deben indicarse una serie de parámetros, siendo los más importantes:

- Alturas de los nodos en que se va a dividir, cuya suma determinará la altura total del depósito.
- Coeficiente de pérdidas por unidad de área.
- Volumen de acumulación, que será variado en las distintas simulaciones que se llevaran a cabo.

7.4.2.1.4. Controlador y bombas

Serán necesarias dos bombas, una a cada lado del intercambiador, que produzcan el movimiento del fluido. Sus características y consumo son los indicados en el apartado de dimensionado de equipos, y se activarán en función de la señal emitida por el controlador.

El controlador monitoriza los valores de la temperatura de salida de captadores y la de retorno del acumulador hacia captadores. En nuestro caso, las bombas se activarán cuando la diferencia entre ambas temperaturas sea mayor de 8 °C, y se detendrá cuando la diferencia sea de 2 °C. Consta de histéresis, para evitar que haya continuos arranques de las bombas.

El controlador también tiene en cuenta la temperatura desde el acumulador a la carga de ACS, para mantenerla por debajo de una temperatura máxima.

7.4.2.1.5. Caldera auxiliar de ACS

La caldera auxiliar también estaba presente en la instalación. Para su estudio, se ha usado el componente de TRNSYS (type 6) que simula una caldera auxiliar capaz de mantener a su salida una temperatura de consigna determinada, de 60 °C en nuestra instalación. Como datos de entrada necesita el flujo y la temperatura del fluido que proviene del acumulador, mezclado o no con agua fría. Si la temperatura del fluido a la entrada es menor a la temperatura de consigna, proporcionará la energía necesaria para calentar el fluido hasta ella.

El otro dato necesario es su capacidad máxima, que como ya se comentó será de 24 kW. Para saber su consumo de combustible, haremos un balance suponiendo que la caldera tiene un rendimiento del 92%.

7.4.2.1.6. Otros elementos

El agua es tomada de la red de abastecimiento, a una temperatura y flujo cuyos valores horarios son suministrados mediante dos archivos. Posteriormente, entra en un desviador de flujo, que decide en función de la temperatura de consigna de ACS, cuanto debe entrar al acumulador, y cuando deberá mezclarse a la salida de este para bajar su temperatura a la de consigna, en caso de que a la salida del acumulador fuera superior.

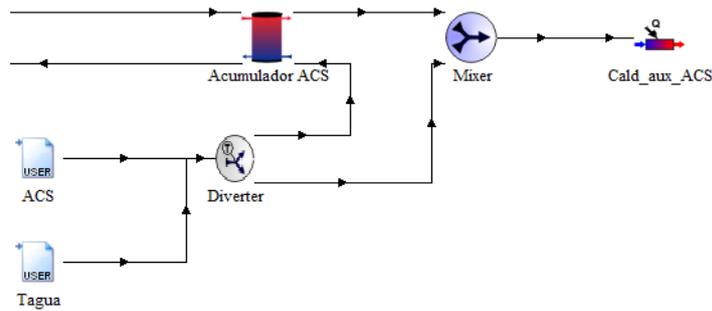


Figura 7.28: Elementos del secundario de la instalación de ACS

7.4.2.1.7. Esquema completo de la parte de Agua Caliente Sanitaria

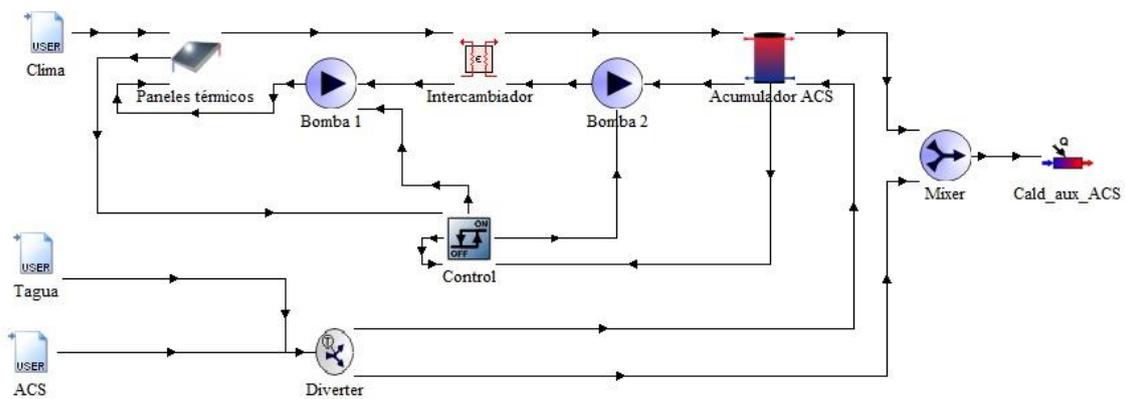


Figura 7.29: Esquema simplificado del sistema de ACS

7.4.2.2. Abastecimiento de calefacción

7.4.2.2.1. Aprovechamiento del calor residual de los motores

Como ya se ha comentado anteriormente, uno de los propósitos principales del presente proyecto es simular un sistema de micro-cogeneración.

Para su implementación, se ha diseñado una herramienta de cálculo mediante ecuaciones, que simula un intercambiador para determinar la parte de la energía residual que es posible aprovechar. Esto se ha hecho teniendo en cuenta dos consideraciones:

- Se ha supuesto un intercambiador de efectividad constante e igual a 0.7 para el intercambio entre la energía residual de los motores y el fluido que irá al acumulador de calefacción.

- Se va a suponer que se puede aprovechar un 80 % de la energía residual de los motores, puesto que el 20% no será aprovechable debido a pérdidas con el ambiente y otras cuestiones.

Es un dato que se ha consultado en base a distintas publicaciones.

Una vez calculada la cantidad de calor residual aprovechable, se calcula la temperatura a la salida del intercambiador haciendo balance:

$$T_{sal} = T_{ent} + \frac{Q_{residual_{aprov}}}{m \cdot C_p}$$

Dónde: T_{ent} es la temperatura de entrada del intercambiador, T_{sal} es la temperatura de salida y $Q_{residual_{aprov}}$ es el calor residual aprovechable.

Dicha temperatura de entrada es la de salida de la bomba, que a su vez proviene de la parte fría del acumulador.

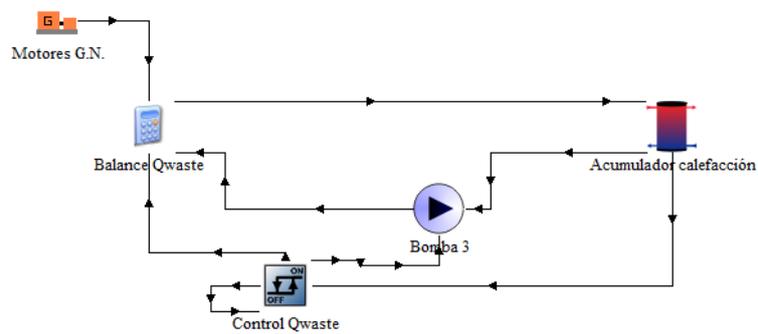


Figura 7.30: Aprovechamiento del calor residual de los motores en TRNSYS

7.4.2.2.2. Acumulador de calefacción

Se ha empleado el mismo tipo de acumulador que para el abastecimiento de agua caliente sanitaria. Los volúmenes de almacenamiento serán variados en las simulaciones que se van a realizar.

7.4.2.2.3. Caldera de calefacción

Se ha usado también el mismo modelo que para agua caliente sanitaria. El parámetro a variar en cada zona climática es la potencia máxima que puede suministrar, que como ya se mencionó se ha calculado para las cargas máximas anuales sin tener en cuenta las horas de arranque. En este caso además, la temperatura de consigna será de 80 °C. Para saber su consumo de combustible, haremos un balance suponiendo que la caldera tiene un rendimiento del 92%.

7.4.2.2.4. Controlador y bombas

Los componentes del controlador y las bombas son los mismos que los empleados para agua caliente sanitaria, pero la forma en la que actúan los controladores es distinta.

En el caso de la bomba 3, se van a hacer simulaciones con distintas formas de regulación. Se explicarán las soluciones adoptadas más adelante en la sección correspondiente.

La bomba 4, sin embargo, se activará siempre que exista demanda de calefacción en el edificio. Su caudal ha sido calculado en base a la demanda máxima anual de calefacción, suponiendo un salto térmico en los radiadores de 20 °C.

7.4.2.2.5. Esquema parte de calefacción

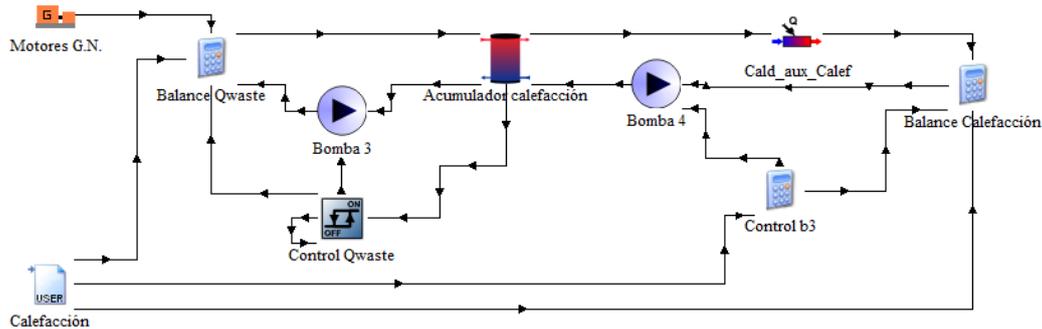


Figura 7.31: Esquema simplificado de calefacción en TRNSYS

7.4.2.3. Esquema subsistema térmico al completo

El esquema térmico completo sin incluir determinados elementos que dificultan la visualización de la instalación, pero que son necesarios para que TRNSYS pueda hacer las simulaciones, es el siguiente:

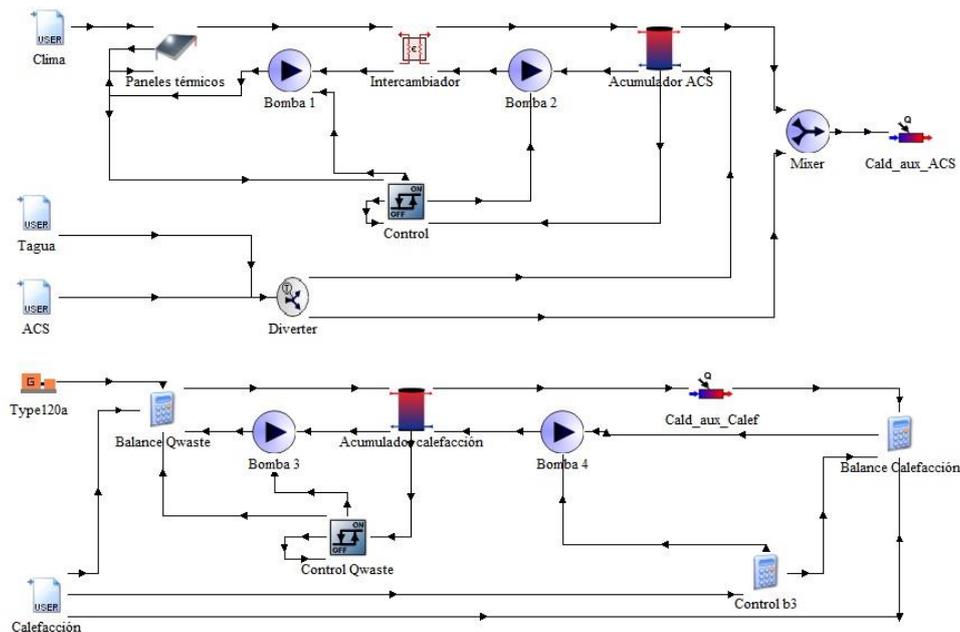


Figura 7.32: Subsistema térmico simplificado en TRNSYS

7.4.3. Esquemas de la instalación completa

A continuación se muestran los esquemas de la instalación diseñada en TRNSYS al completo, tanto de forma simplificada como con todas las conexiones necesarias para hacer las simulaciones.

Esquema simplificado:

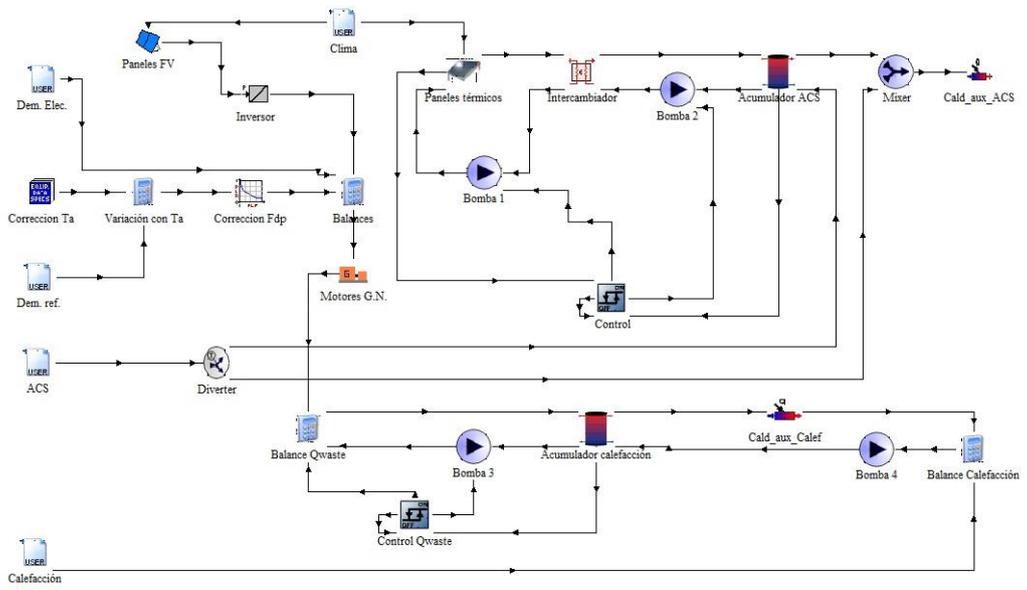


Figura 7.33: Esquema completo simplificado en TRNSYS

Esquema con todas las conexiones necesarias para la simulación:

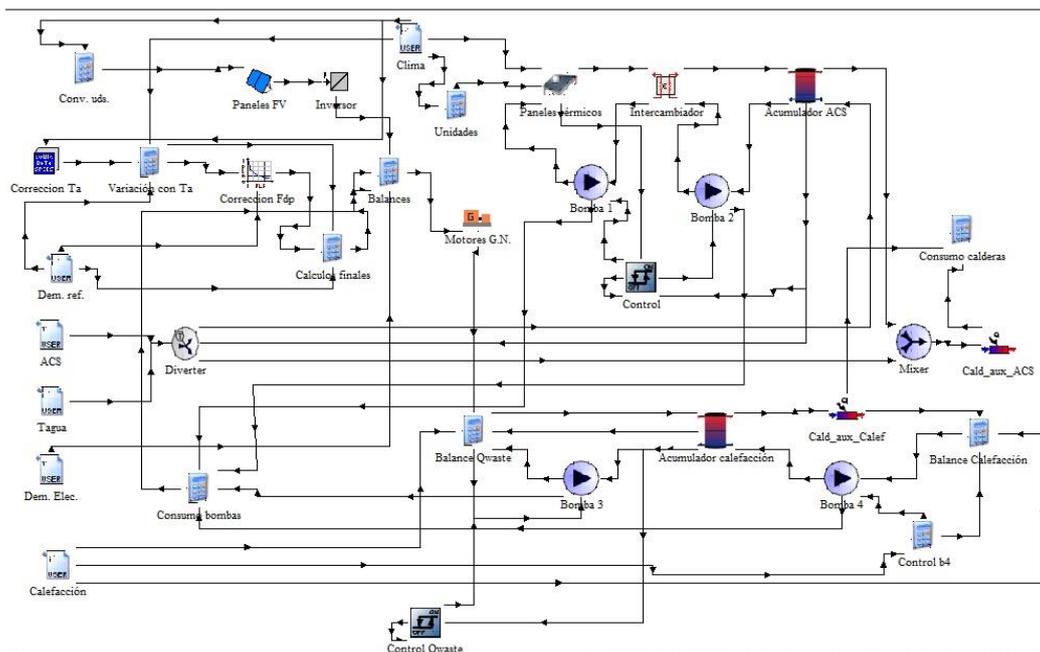


Figura 7.33: Esquema completo de la instalación en TRNSYS

