



REGULAR ARTICLE

Physics & Engineering

Perfiles de Consumo de Agua Caliente Residencial Aplicados a un Colector Tubular Plano para el Calentamiento Solar de Agua en Bogotá

Domestic Hot Water Consumption Profiles Applied to a Flat Tubular Collector for Solar Water Heating in Bogotá

Juan Andrés Ávila Carranza ^{1*} | Carlos Mario Rocha-Osorio ^{2†} |

Juan Sebastián Solís-Chaves ^{3‡}

¹Estudiante de Tecnología en Automatización y Robótica Industrial, Universidad ECCI

²Investigador Experto. Línea de Investigación en Energía Eléctrica SENNOVA - CPIC SENA/Caldas

³Docente Investigador de la Universidad ECCI, Departamento de Ingeniería Mecatrónica.

Correspondence

Juan Andrés Ávila C

Email: juana.avilac@ecc.edu.co

Copyright: Licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Interna.



Editor: Robert Salazar

Editorial assistant: Luz Adriana Suárez Suárez.

How to cite

J. A. Ávila-Carranza C. M. Rocha-Osorio and J. S. Solís-Chaves, *Perfiles de Consumo de Agua Caliente Residencial Aplicados a un Colector Tubular Plano para el Calentamiento Solar de Agua en Bogotá*, TECCIENCIA, Vol. 15, No. 28, 1-22, 2020
DOI:<http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.28.3>

ABSTRACT. The use of Flat Solar Collectors for the generation of Domestic Hot Water (DHW), facilitates access to this resource in an efficient, economical and sustainable way. The Sustainable Development Goals proposed by the UN, referring specifically to sustainable water management and access to renewable energy, are the main motivation for this work, since the former is an essential vital resource and its access reduces the inequality index, in developing countries such as Colombia, while the use of solar thermal energy reduces the environmental impact of the water heating process, thus reducing the consumption of electrical energy in the residential sector. Therefore, this work proposes to estimate DHW profiles through a spreadsheet that models the DHW flow thermodynamically for a whole year, making it possible to evaluate the energy performance of a Solar Collector available in the Colombian market and that is used in four types of dwellings located in the city of Bogotá. The simulation results present the DHW consumption profiles in $[kg/h]$ per year, with DHW temperatures of up to $21 [^{\circ}C]$, for a total transmitted irradiance of the order of $1100 [W/m^2]$, which produces thermal energy close to $1kW$. This comparative analysis allows us to review the technical and economic feasibility of solar collectors installed in single-family homes and with a DHW consumption profile close to the Colombian socio-economic reality.

Key Words: Domestic Hot Water (DHW), Flat Plane Solar Collectors (FPSC), Solar Thermal Energy, System Advisor Model (SAM)

RESUMEN. El uso de Colectores Solares Planos para la generación de Agua Caliente Sanitaria (ACS), facilita el acceso a este recurso de forma eficiente, económica y sostenible. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU, referidos específicamente a la gestión sostenible del agua y el acceso a energías renovables, son la motivación principal de este trabajo, puesto que el primero es un recurso vital esencial y su acceso reduce el índice de desigualdad, en países en desarrollo como Colombia, mientras que el uso de energía solar térmica, reduce el impacto ambiental del proceso de calentamiento de agua, disminuyendo el consumo de energía eléctrica del sector residencial. Por tanto, este trabajo propone estimar perfiles de ACS a través de una hoja de cálculo que modela el flujo de ACS termodinámicamente para todo un año, haciendo posible evaluar el desempeño energético de un Colector Solar disponible en el mercado colombiano y que es usado en cuatro tipos de viviendas ubicadas en la ciudad de Bogotá. Los resultados de la simulación presentan los perfiles de consumo de ACS en $[kg/h]$ por año, con temperaturas de ACS de hasta $21 [^{\circ}C]$, para una irradiancia total transmitida del orden de $1100 [W/m^2]$, que produce una energía térmica cercana a $1kW$. Este análisis comparativo permite revisar la factibilidad técnica y económica de los colectores solares instalados en viviendas unifamiliares y con un perfil de consumo de ACS cercano a la realidad socio-económica colombiana.

Palabras clave: Agua Caliente Sanitaria (ACS), Colector Solar para Calentamiento de Agua (CSCA), Energía Solar Térmica, System Advisor Model (SAM).

*SAM simulation model FPSC, DWH spreadsheet adaptation, obtention and analysis of results, writing.

†Grammar checking, validation of results, writing style.

‡Original idea and concept, theoretical analyses for FPSC and DHW, validation of results, writing style.

1 | INTRODUCCIÓN

La energía solar es una de las energías renovables que se puede aprovechar directamente, utilizando la energía de los fotones de la luz solar o indirectamente, calentando las masas de aire que producirán las corrientes de viento. El sistema de calentamiento solar de agua, por otro lado, es una de las aplicaciones de la energía solar que ha atraído gran atención entre los investigadores desde hace tiempo. Este aprovechamiento de la energía solar se conoce como energía solar térmica. Los colectores solares, los tanques de almacenamiento y los fluidos de transferencia de calor son los tres componentes principales del colector solar para el calentamiento de agua o el calentador solar de agua [1].

Los colectores solares pueden definirse como intercambiadores de calor que aprovechan la radiación solar global (directa y difusa) para calentar un fluido usualmente a bajas temperaturas [2]. Los procesos de diseño y dimensionamiento de colectores solares deben, por lo tanto, atender la necesidad de incrementar las tasas de flujo de calor sin que esto signifique un incremento desproporcionado de las pérdidas por fricción. En este sentido, los análisis termodinámicos que involucran la segunda ley permiten cuantificar tanto las irreversibilidades asociadas a las pérdidas por fricción como aquellas asociadas a la transferencia de calor.

Por otra parte, el uso de Agua Caliente Sanitaria (ACS) representa una fracción significativa del consumo de energía en diferentes tipos de edificios. Lograr una caracterización detallada de los perfiles de uso de ACS es por tanto, relevante, ya que esta información permite una acertada evaluación de la eficiencia energética de sistemas de calentamiento de agua usados en edificaciones. Un conocimiento más profundo de las características de los perfiles de demanda de ACS permitirá el diseño óptimo de estos sistemas y de estrategias de control innovadoras basadas en patrones específicos del consumo de los usuarios.

Es importante también, realizar una estimación precisa del consumo de energía calorífica necesaria para la producción de ACS por medio de un proceso helio-térmico como el termosifón, aplicada a un modelo de Colector Solar para el Calentamiento de Agua (CSCA), instalado en unas condiciones climáticas específicas (la ciudad de Bogotá en este caso), usando para esto el modelo computacional de un prototipo comercial de CSCA ya disponible en el mercado y considerando además que el tipo de inmueble a analizar, se restringe al sector residencial, considerando también algunos factores socioeconómicos como los descritos en [1].

El ACS es empleada principalmente para satisfacer las necesidades de baño, limpieza y consumo humano; ésta contribuye significativamente a la demanda de energía en las viviendas. Dada la importancia demostrada de los perfiles de consumo de ACS para el determinar el rendimiento energético en edificaciones, es una práctica común analizar los perfiles de ACS solar y sistemas solares combinados, siendo posible realizar simulaciones a corto, medio y largo plazo (por ejemplo, anuales) utilizando perfiles diarios repetitivos [3, 4, 5, 6].

En los hogares colombianos se presenta un consumo de agua caliente a lo largo del día. Por tanto, la iniciativa principal de este proyecto se basa en estimar los perfiles de consumo diario de ACS, por medio de una hoja de cálculo, para cuatro tipos de hogares ubicados en la ciudad de Bogotá en los que se simula instalar un modelo de CSCA comercial [7].

Para ello se analiza cuáles son los consumos típicos de ACS para una vivienda en un periodo de 24 horas. La hoja de cálculo adaptada para las condiciones geográficas y meteorológicas de Bogotá, se basa en el manual de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) [8], específicamente toma información del Capítulo "*Hot Water Demand Calculations*", en el que se presenta la metodología de estimación de este consumo. Se propone entonces crear un archivo con extensión CSV, para un periodo de un año y compatible con el perfil de ACS que requiere el modelo computacional del CSCA disponible en SAM [9, 10], para simular el consumo energético del colector y comparar los diferentes perfiles de ACS estimados para cuatro diferentes de viviendas unifamiliares tipificadas.

Gracias al System Advisor Model (SAM), desarrollado por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, por sus siglas en inglés) es posible obtener características técnicas y financieras de diferentes tipos de sistemas de generación de energía con fuentes renovables. Con el modelo computacional, se consigue un escenario de simulación para una ubicación geográfica específica y con unas condiciones ambientales, con las que se determina la energía generada y sus costos asociados. Los datos de la simulación pueden proporcionar información sobre la factura de electricidad, el flujo de caja del proyecto, la energía generada por mes entregada a la carga,

la energía anual almacenada y suministrada por las baterías, el costo nivelado de energía, el pago de la deuda del proyecto, etc. Los modelos financieros de SAM pueden representar proyectos residenciales y comerciales que compran y venden electricidad a precios minoristas y proyectos tipo acuerdo de compra de energía (*Power Purchase Agreement*) para cumplir con los requisitos de la tasa interna de rendimiento [11].

La organización de este artículo, para explicar claramente su aporte de investigación es la siguiente: En la Sección 2 se presenta el modelo termodinámico de los CSCA tubulares planos y del tanque de almacenamiento. Enseguida, en la Sección 3 se presenta el modelo matemático del perfil de consumo de ACS, incluyendo la extracción de agua caliente, la temperatura de entrada a la red y la energía de calentamiento. Después, en la Sección 4, se describe la hoja de cálculo que permite determinar los perfiles de ACS para los cuatro tipos de hogares considerados. Posteriormente, en la Sección 5 se explica la configuración del CSCA en el Software SAM. Los resultados de simulación son presentados en la Sección 6 y finalmente en la Sección 7 se exponen las conclusiones derivadas de esta investigación. Los Apéndices A y B presentan el resumen de los principales resultados de la hoja de cálculo empleada para la estimación de los perfiles de ACS y el resumen de los casos simulados en SAM para los cuatro tipos de hogares considerados.

2 | LOS COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA

Los *Flat Plane Solar Collectors* (FPSC) pueden definirse como intercambiadores de calor que aprovechan la radiación solar global (directa y difusa) para calentar un fluido usualmente a bajas temperaturas y sus principales aplicaciones son el calentamiento de agua, acondicionamiento de aire y procesos de secado de alimentos [2]. Un esquema del CSCA tubular plano y de su instalación complementaria [12] para uso doméstico se presenta en la Figura 1.



FIG. 1 Esquema de funcionamiento del calentamiento de ACS. [12]

Gracias al proceso generado por el CSCA es posible aprovechar el calor producido por la radiación solar, para obtener ACS y ser usada por un lado en procesos industriales como desinfección, esterilización, teñido, así como en cualquier situación en la que se requiera cambiar la temperatura de manera residencial, por ejemplo, en el uso doméstico, para cocinar, consumo y realizar labores de limpieza. [12]

Los calentadores solares de agua se caracterizan por su rendimiento térmico y dependen en gran medida de la transmitancia, absorción, conducción de energía solar y conductividad del fluido trabajado. Con este sistema se aprovecha directamente el sol para calentar agua, ahorrando costos en la factura del gas o electricidad y disminuyendo el impacto en el medio ambiente. También es excelente para complementar un sistema de

energía eléctrica de paneles solares, pues no habría necesidad de generar energía para calentar agua. Por tanto, resulta de interés evaluar el consumo del ACS generada a partir de un sistema renovable de calentamiento solar de agua, de uso doméstico, como el presentado en la Figura 1 y que se encuentre disponible en el mercado colombiano.

El modelo termodinámico [2] y el balance energético [10] del CSCA de la Figura 1 se expone enseguida, incluyendo el tanque de almacenamiento (también llamado Acumulador de ACS).

2.1 | Ecuación Térmica de un Colector Solar Plano

La tasa de energía útil $\dot{Q}_u$ en [W], para un Flat Plane Solar Collector o un CSCA [2, 10], viene dada por la ecuación (1):

$$\dot{Q}_u = A_c [(\alpha\tau)I(t) - U_L(T_p - T_a)] \quad (1)$$

Donde:

α y τ son la capacidad de absorción y transmisividad de la superficie cristalina del colector, respectivamente; $I(t)$ es la Radiación Solar Total Incidente sobre el plano del material absorbente en [W/m^2]; T_p y T_a son las Temperaturas de la placa y del ambiente (dadas en [$^{\circ}C$]). Y finalmente U_L es el coeficiente global de pérdida de calor para el colector solar (también en [W/m^2] [$^{\circ}C$]).

2.2 | Balance Energético de un Calentador Solar de Agua

La tasa de energía térmica disponible ($\dot{Q}_{um}$) a partir de un colector solar plano, también de acuerdo con [2, 10], constituido por múltiples capas conectadas en paralelo, puede ser escrita como en (2):

$$\dot{Q}_{um} = A_{cm}F'[(\alpha\tau)I(t) - U_L(T_f - T_a)] = \dot{m}_f C_f(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Donde:

$A_{cm} = mA_c$ es el área efectiva del colector solar plano, F' es el factor de eficiencia de recolección de la placa solar plana; T_2 y T_1 son las temperaturas de entrada y salida de agua de los colectores solares conectados en paralelo; $\dot{m}_f$ es la salida másica del agua debida a la circulación natural, que a su vez depende de la radiación solar; y T_f es la temperatura media de la salida y de la entrada del agua.

2.3 | Ecuación Térmica del Tanque de Almacenamiento

Para el tanque de almacenamiento, la energía térmica disponible de los múltiples colectores planos se distribuirá de la siguiente manera (3):

- La energía térmica almacenada en el agua en el tanque de almacenamiento,
- La energía térmica perdida en el aire ambiente del tanque de almacenamiento, y
- La energía térmica tomada del tanque de almacenamiento.

$$\dot{m}_f C_f(T_2 - T_1) = M_W C_W \frac{dT_W}{dt} + (UA)_t(T_W - T_a) + \dot{M}_W C_W(T_W - T_a) \quad (3)$$

Donde:

M_W y $\dot{M}_W$ son la masa de agua en el tanque y la tasa de flujo másico de la retirada de agua caliente. $(UA)_t$

es un coeficiente global de transferencia de calor del agua del tanque de almacenamiento para el aire del ambiente a través del aislamiento.

3 | LOS PERFILES DE CONSUMO DE AGUA CALIENTE SANITARIA

Estos son una especificación del consumo anual (caudal) de ACS ($m_{consumo}(t)$) y la temperatura de entrada de la red ($T_{red}(t)$) para un periodo determinado de tiempo, como por ejemplo, un año.

El modelo termodinámico y estadístico del perfil de consumo de ACS o *Domestic Hot Water Draw (DHW)* se presenta con todo detalle en los trabajos de Burch, et al. [4], [5] [6]. Las clasificaciones de rendimiento anual para los CSCA son emitidas por *Solar Rating and Certification Corporation (SRCC)*. Una especificación de extracción indica el uso de agua caliente y la temperatura de entrada de la red durante un año. Los perfiles y los procesos se clasifican más simple y se reducen los costos al brindar interpretaciones y explicaciones más fáciles al problema de medir el consumo de ACS. La Figura 2 presenta un diagrama de bloques que representa el sistema de suministro de agua potable, mostrando la importancia de la temperatura ambiente (T_{amb}) sobre la temperatura de la red de ACS (T_{mains}).

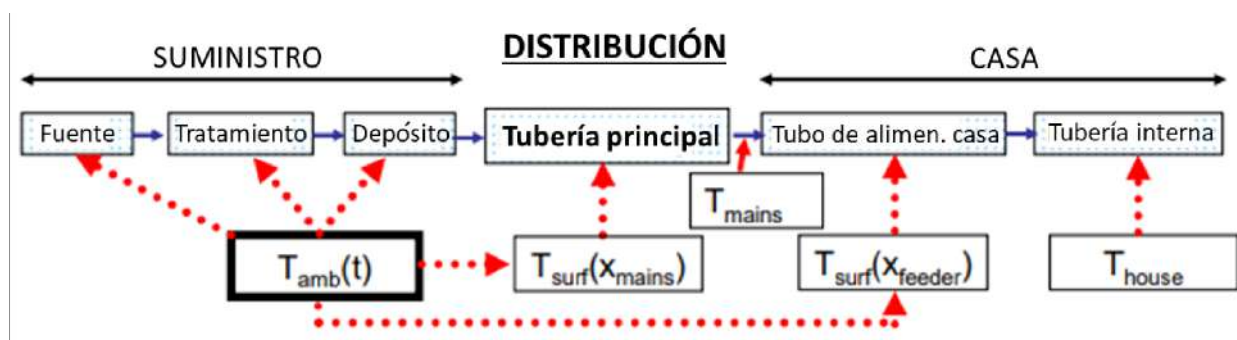


FIG. 2 Diagrama de bloques de un sistema de suministro de agua potable y su relación con diferentes temperaturas. Adaptada de [5].

Este modelo proporciona perfiles de ACS realistas con base en el análisis de los servicios de consumo en el hogar, de los que depende significativamente el perfil de ACS. La hoja de cálculo utilizada aquí, considera que el uso de agua promedio es el mismo, independientemente de la ubicación y la época del año [5]. Se supone que los volúmenes de agua templada y no templada son los mismos, en promedio, para todos los sitios y épocas. Una implicación importante de esta suposición es que el agua caliente extraída del calentador de agua variará con el clima y la temperatura.

Existe una corrección por entrega desigual de energía a la carga entre la fuente solar térmica y la fuente no solar, que se define como un tanque de almacenamiento eléctrico o un tanque de almacenamiento de gas. Estos perfiles de consumo serán parte de la información de datos de entrada para la simulación del desempeño energético del CSCA seleccionado [7].

3.1 | Extracción de agua caliente y templada

El uso doméstico del agua fría se aplica directamente en lavaplatos y lavadoras, teniéndose en cuenta además que en este trabajo los datos de agua fría se consideran de volumen fijo ($1 - f_{hot}$), como lo expresa la ecuación (4). El agua caliente se extrae del sistema de calentamiento de agua, y se lleva directamente a los elementos consumidores de ACS, sin ninguna mezcla de agua fría (es decir, se considera únicamente el consumo de ACS a la salida del tanque del CSCA). Los puntos de ACS considerados para los hogares incluyen lavaplatos, baños y duchas, que es donde hay una interacción directa con la piel humana. El agua de uso final se calienta a temperaturas de uso agradables mezclando agua fría y caliente para lograr la temperatura de uso final deseada (T_{use}).

La fracción de agua caliente extraída del tanque se presenta en la siguiente ecuación de temperatura (4):

$$f_{hot} = \frac{(T_{use} - T_{mains})}{(T_{hot} - T_{mains})} \quad (4)$$

Donde:

T_{use} es la temperatura de uso final del agua, T_{hot} es la temperatura de la fuente de calor. La fracción de agua fría $(1 - f_{hot})$, para una determinada temperatura de uso T_{use} , una temperatura de de la fuente T_{hot} y una fracción de ACS f_{hot} que dependen de la temperatura en la tubería T_{mains} .

Una suposición propuesta por Burch y Thorton [4] y que se acoge aquí también, es considerar que para un nivel dado de volumen de ACS, el uso de agua es el mismo en promedio, independientemente de la ubicación y la época del año. Además, los volúmenes de agua caliente y fría son los mismos, en promedio, para todos los lugares y épocas [4].

3.2 | Temperatura de entrada a la red

El algoritmo para la temperatura del sistema basado en el consumo, tiene la forma general descrita de la siguiente ecuación (5):

$$T_{mains} = T_{amb,avg} + R\Delta T_{amb} \sin(\omega_{amb}t - \phi_{mains}) \quad (5)$$

Donde basado en las temperaturas de la red se emplea de la siguiente forma (6):

$$\Delta T_{amb} = \left[\frac{(T_{mon,max} - T_{mon,min})}{2} \right] \quad (6)$$

T_{mains} está linealmente relacionada con la temperatura ambiente promedio $T_{amb,avg}$ y la fluctuación anual en T_{mains} se toma como una fracción R (Relación entre $\Delta T_{grid}/\Delta T_{surf}$) respecto del ΔT_{amb} . Siendo $(T_{mon,max})$ la temperatura de intervalo mensual máxima y $(T_{mon,min})$ la temperatura de intervalo mensual mínima a la que se ve expuesta el agua durante los cambios mensuales de temperatura.

Para este caso, $\Delta T_{offset} = 0$, $R = 0,005$ y ϕ_{mains} se asume constante. Como es propuesto en [4], el $+\Delta T_{offset}$ se ajusta a $-15 [^{\circ}C]$, además R y T_{mains} están correlacionadas con la temperatura promedio anual $(T_{amb,ann})$, de acuerdo con (7):

$$R = a_1 + a_2 T_{amb,ann} \quad (7)$$

Y el caudal en la tubería (8):

$$\phi_{mains} = a_3 + a_4 T_{amb,ann} \quad (8)$$

a_i , $i = 1, \dots, 4$ son parámetros que se determinan ajustando conjuntos de datos para T_{mains} que abarcan un amplio rango de la temperatura ambiente anual $(T_{amb,ann})$. En este caso en particular, para la hoja de cálculo usada: $a_1 = 0,4$; $a_2 = +0,010^{\circ}F^{-1}$; $a_3 = 35 \text{ Deg}$; $a_4 = -0,01 [^{\circ}C]/[^{\circ}F]$ y R es la relación de amplitudes $\Delta T_{grd}(z)/\Delta T_{surf}$, con z como la distancia vertical desde la superficie del colector hacia el suelo [4].

Una variación en la temperatura de la tubería (T_{mains}) de δT_{mains} induce un aumento en el parámetro operativo de la temperatura de entrada respecto de la temperatura ambiente y la radiación incidente $(T_{in} -$

$T_{amb})/I_{inc}$ y provoca una reducción en la eficiencia del CSCA.

Para T_{amb} e I_{inc} constantes, la ecuación de eficiencia del η_{col} del CSCA lineal (9) implica que:

$$\frac{\delta\eta_{col}}{\eta_{col}} = -\frac{F_r U_l * \delta T_{main s}}{\eta_{col} I_{inc}} = -\frac{\delta Q_{loss}}{Q_{use}} \quad (9)$$

Puede observarse que la variación de la eficiencia depende de la pendiente de la curva de eficiencia, que es el valor $F_r U_l$ del colector. Siendo F_r el factor de remoción del calor, U_l el coeficiente de pérdidas del colector. El signo negativo presupone la absorción de calor, en lugar de su irradiación.

3.3 | Cálculo de la Energía de Calentamiento

La energía calorífica ahorrada (10) se puede expresar en función de la energía gastada en los equipos auxiliares del tanque y del colector, así como el calor entregado por el CSCA:

$$Q_{saved} = [Q_{aux,ref} - (Q_{aux,sol} + Q_{par,sol})] + \frac{(Q_{deliv,ref} - Q_{deliv,sol})}{\eta_{conv}} \quad (10)$$

Donde:

Q_{saved} siendo la energía ahorrada por el sistema solar, $Q_{aux,ref}$ es la energía de respaldo auxiliar de referencia, típicamente en el calentador de agua a gas o eléctrico. $Q_{aux,sol}$ es la energía de respaldo auxiliar del sistema solar, $Q_{par,sol}$ es la energía parásita (por ejemplo, bomba, controlador) del sistema solar, $Q_{deliv,ref}$ es la energía entregada a la carga de referencia, $Q_{deliv,sol}$ es la energía entregada a la carga del sistema solar y η_{conv} es la eficiencia térmica del combustible (gas natural o propano) que se emplea para el calentamiento del agua directamente en el proceso dentro del calentador, ver figura 1.

El último término es una corrección por entrega desigual de energía a la carga entre la referencia solar y no solar [4] (la SRCC define la referencia como un tanque de almacenamiento eléctrico o de gas, como se presenta en la figura 1).

4 | HOJA DE CÁLCULO PARA EL CONSUMO DE ACS RESIDENCIAL

Esta Hoja de Cálculo [13] se configuró para la ciudad de Bogotá, obteniendo los perfiles de consumo de ACS que luego serían cargados en SAM para su simulación de desempeño energético.

Para los diferentes consumos de ACS se tuvo en cuenta cuatro (4) tipos de hogares, cuyo consumo de agua, está basado en la cantidad de servicios suministradores de ACS que haya en los modelos de hogares considerados. Es decir que el consumo de ACS aumenta, cuánto más servicios existan en el hogar. Se generaron tablas considerando los datos base ingresados al Macro, como son la variación de temperatura ambiente máxima y mínima y su promedio anual, la temperatura de compensación de la red, la proporción del tanque y medidas volumétricas y los flujos de consumo de ACS en duchas, lavamanos y lavaplatos.

Esta hoja de cálculo en Excel contiene las ecuaciones (5) a (8) descritas en la Sección 3, se organizaron los consumos dependiendo la temperatura ambiente mensual a lo largo de un año. La información de los servicios de ACS por tipo de hogar se organizan en archivos separados por comas con 8760 resultados, pues SAM asume que hay 8760 horas al año¹, independientemente de si el año es bisiesto o no. Se convirtieron los galones por minuto [gpm] a kilogramos por hora [kg/h], que es la unidad que requiere SAM para ingresar el perfil de consumo de ACS [9].

¹ 24 horas/día × 365 días/año = 8760 horas/año.

4.1 | Tipos de Hogares Considerados

Para la consideración de los diferentes tipos hogares se identifican principalmente la cantidad de elementos consumidores de ACS existentes en la residencia, para esto se emplea el macro de Excel [13] en el que se encuentran las ecuaciones descritas en la sección 4, entregando como resultado los datos del caudal de ACS (f_{hot} y de agua fría ($1 - f_{hot}$)). Posteriormente se filtran únicamente los elementos consumidores de ACS considerados (Lavámanos, ducha, fregadero de la cocina), pudiéndose obtener los diferentes perfiles de consumo de ACS para los cuatro tipos de hogares considerados.

Los hogares en la ciudad de Bogotá comúnmente se dividen por estratos socio-económicos dependiendo del sector de la ciudad donde se encuentren. Basándose en esto se realizó la caracterización de los diferentes hogares y su consumo de ACS, como se evidencia en las Tablas 1, 2, 3 y 4. Para dicha caracterización se decidió separar en 4 tipo de hogares y en 4 tipos de elementos consumidores de ACS, esto para poder obtener una comparación directa entre ellos mediante el macro de Excel.[13] Para el hogar tipo 1 se consideraron una ducha, un lavamanos, un bidé o baño y un fregadero de la cocina, para el hogar tipo 2 se determinaron una ducha, dos lavamanos, un bidé o baño y un fregadero de la cocina, para el hogar tipo 3 se establecieron una ducha, dos lavamanos, dos bidés o baños y un fregadero de la cocina, y por último, para el hogar tipo 4 se consideraron dos duchas, dos lavamanos, dos bidés o baños y un fregadero de la cocina. A partir de los datos de la hoja de cálculo se obtienen 4 perfiles de consumo de ACS anual, en $[kg/h]$, para cada tipo de hogar considerado.

TABLE 1 Tabla de datos y variables consumidoras de ACS para residencia tipo 1.

ELEMENTOS	CANTIDAD	TIEMPO PROMEDIO DE CONSUMO	TASA DE FLUJO C y F (kg/h)	TASA DE FLUJO CALIENTE (kg/h)	TASA DE FLUJO FRIO (kg/h)
Baño	1	Segundos: 19638	55468,032	45822,010	9646,021
		Minutos: 327,3			
		Hora: 5,455			
Fregadero de la cocina	1	Segundos: 231450	1416774,756	1170224,345	246550,411
		Minutos: 3857,5			
		Hora: 64,292			
Ducha	1	Segundos: 137202	147941,855	122186,990	25754,864
		Minutos: 2286,7			
		Hora: 38,112			
Lavamanos	1	Segundos: 33888	203241,360	167897,935	35343,425
		Minutos: 564,8			
		Hora: 9,413			

TABLE 2 Tabla de datos y variables consumidoras de ACS para residencia tipo 2.

ELEMENTOS	CANTIDAD	TIEMPO PROMEDIO DE CONSUMO	TASA DE FLUJO C y F (kg/h)	TASA DE FLUJO CALIENTE (kg/h)	TASA DE FLUJO FRIO (kg/h)
Baño	1	Segundos: 19614	62872,733	51945,761	10926,972
		Minutos: 326,9			
		Hora: 5,448			
Fregadero de la cocina	1	Segundos: 288678	1753858,104	1448727,194	305130,910
		Minutos: 4811,3			
		Hora: 80,188			
Ducha	1	Segundos: 163056	179326,778	148088,194	31238,583
		Minutos: 2717,6			
		Hora: 45,293			
Lavamanos	2	Segundos: 38292	234555,421	193765,811	40789,610
		Minutos: 638,2			
		Hora: 10,637			
		Segundos: 40542	256744,995	212080,021	44664,974
		Minutos: 675,7			
		Hora: 11,262			

TABLE 3 Tabla de datos y variables consumidoras de ACS para residencia tipo 3.

ELEMENTOS	CANTIDAD	TIEMPO PROMEDIO DE CONSUMO		TASA DE FLUJO C y F (kg/h)	TASA DE FLUJO CALIENTE (kg/h)	TASA DE FLUJO FRIO (kg/h)
Baño	2	Segundos:	24012	73866,450	61029,635	12836,815
		Minutos:	400,2			
		Hora:	6,67			
		Segundos:	10146	29400,312	24280,957	5119,355
		Minutos:	169,1			
		Hora:	2,818			
Fregadero de la cocina	1	Segundos:	339894	2046043,552	1690104,372	355939,179
		Minutos:	5664,9			
		Hora:	94,415			
Ducha	1	Segundos:	196944	208510,414	172204,127	36306,287
		Minutos:	3282,4			
		Hora:	54,707			
Lavamanos	2	Segundos:	52230	315720,278	260795,216	54925,063
		Minutos:	870,5			
		Hora:	14,508			
		Segundos:	49836	304178,738	251255,359	52923,378
		Minutos:	830,6			
		Hora:	13,843			

En las Tablas 1, 2, 3 y 4, es posible observar el consumo para cuatro tipos diferentes de hogares, clasificándose según el número de servicios consumidores de ACS, el tiempo promedio de consumo en segundos, minutos y horas y por último las tasas de flujo en $[kg/h]$ para el consumo de agua caliente (C), fría (F) y una mezcla de ambas, para evaluar el desempeño del colector y el gasto de ACS de acuerdo a (4).

La primera columna describe los servicios que consumen ACS, se emplearon en todos los casos los mismos servicios pero variando la cantidad de elementos como se observa en la columna 2, ya que se tiene en cuenta que entre más área construida, más servicios habrán instalados, más personas habitan en la residencia, generándose un mayor consumo de ACS.

La tercera columna describe el tiempo de consumo empleado para cada uno de los elementos consumidores de ACS. Se divide en segundos, minutos y horas, para comprender cuál ha sido la cantidad de tiempo que se ha empleado dicho servicio en el transcurso del año.

TABLE 4 Tabla de datos y variables consumidoras de ACS para residencia tipo 4.

ELEMENTOS	CANTIDAD	TIEMPO PROMEDIO DE CONSUMO		TASA DE FLUJO C y F (kg/h)	TASA DE FLUJO CALIENTE (kg/h)	TASA DE FLUJO FRIO (kg/h)
Baño	2	Segundos:	30672	95868,421	79194,498	16673,922
		Minutos:	511,2			
		Hora:	8,52			
		Segundos:	10146	29400,312	24280,957	5119,355
		Minutos:	169,1			
		Hora:	2,818			
Fregadero de la cocina	1	Segundos:	407688	2472281,758	2042227,125	430054,633
		Minutos:	6794,8			
		Hora:	113,247			
Ducha	2	Segundos:	241158	255268,461	210854,873	44413,588
		Minutos:	4019,3			
		Hora:	66,988			
		Segundos:	79632	84344,823	69674,387	14670,436
		Minutos:	1327,2			
		Hora:	22,12			
Lavamanos	2	Segundos:	57510	345002,486	285008,102	59994,384
		Minutos:	958,5			
		Hora:	15,975			
		Segundos:	10488	29467,995	24339,680	5128,315
		Minutos:	174,8			
		Hora:	2,913			

Con esto se logró identificar, por ejemplo, el tiempo que las personas usan la ducha, en comparación con el tiempo que usan el lavamanos, o el lavaplatos, etc. En las 3 últimas columnas está organizado la tasa de flujo de consumo para cada uno de los servicios de la casa consumidores de ACS, estos datos son la suma del

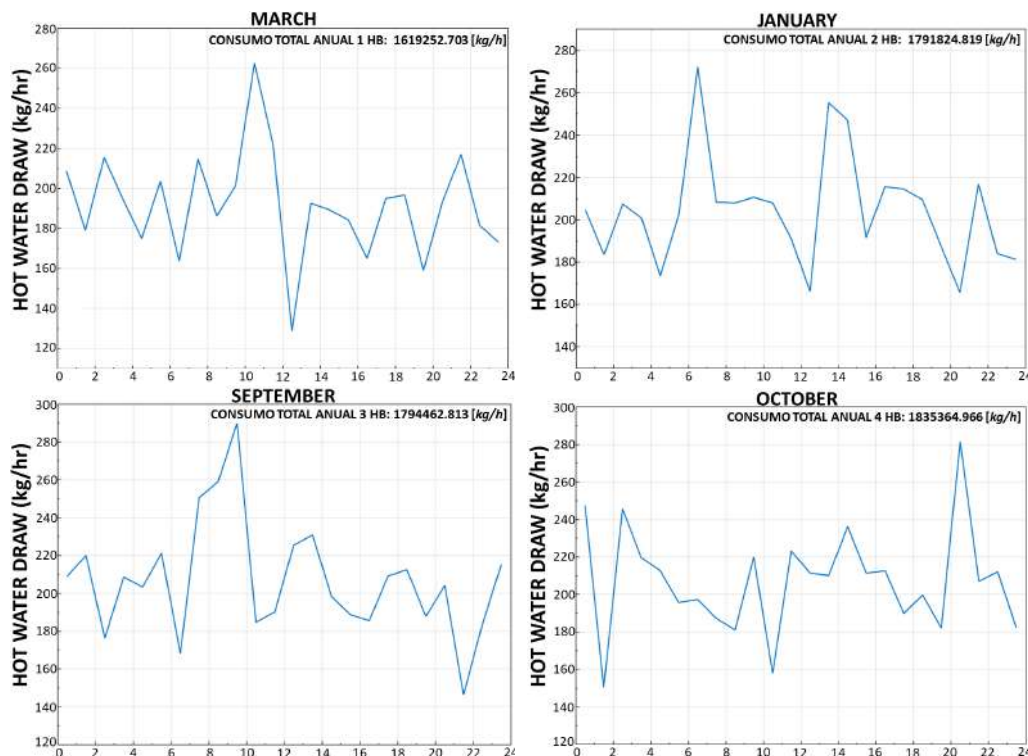


FIG. 3 Perfiles de mayor consumo de ACS mensual para los hogares tipo 1, 2, 3 y 4

consumo individual de estos servicios.

Se presenta además el consumo del agua fría ($1 - f_{hot}$) y el consumo de agua mezclada (C y F), calculados de acuerdo con (4). Sin embargo, para los resultados comparativos, se considera solamente el flujo de agua caliente (C) a la salida del CSCA. Los perfiles de ACS obtenidos a partir de las Tablas anteriores, se pueden ver en la Figura 3.

5 | CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL CSCA EN SAM

En esta Sección se presenta el paso a paso para la creación de un modelo en SAM del CSCA que sigue las expresiones (1), (2) y (3), en conjunto con el Perfil de Consumo de ACS descrito en las Secciones 3 y 4. Inicialmente se configuró SAM para que emplee los datos de la ciudad de Bogotá, incorporando la información geográfica y climática de la ciudad, adicionalmente fueron ingresados los parámetros técnicos del CSCA escogido, los cuales son explicados con todo detalle a continuación:

5.1 | Perfil de Agua Caliente Sanitaria

SAM [9] permite cargar los datos determinados en la sección 4 y visualizarlos, para ser usados en el análisis comparativo de la Sección 6. La figura 3 presenta el perfil de ACS para las cuatro tipos de vivienda considerados.

La hoja de cálculo está diseñada para calcular el consumo de ACS de las ciudades de Estados Unidos, considerando la presencia de estaciones con el consecuente cambio de temperaturas, por lo tanto, tuvo que ser adaptada para la ciudad de Bogotá, esto se realizó añadiendo los datos específicos como las temperaturas mensuales promedio, la temperatura de salida del ACS, en las tuberías, así como también datos como la altitud sobre el nivel del mar.

Ya con los datos específicos de la ciudad y las ecuaciones de la Sección 3, se procedió a organizar los tipos

de hogares considerados de acuerdo a la cantidad de elementos consumidores de ACS, se organizaron los datos en diferentes tablas, separadas por elementos, meses y flujos de agua caliente y fría.

5.2 | Colector Solar para el Calentamiento de Agua (CSCA)

Se deben especificar en SAM [9, 10] algunas características del CSCA, para poder conseguir un escenario real de simulación, entre estas se tienen:

5.2.1 | Azimuth (α)

El azimuth es el ángulo que forma un cuerpo celeste y el Norte, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador. Determina la dirección de un cuerpo celeste.

En la Tabla 5 se puede observar los valores de elevación y de azimuth para la ciudad de Bogotá al medio día.

Fecha	25/11/2019	GTM-5
Ubicación	4,5947396°	-74,0866487°
Hora	Elevación	Azimuth
12:00:00	62,83°	183,02°

TABLE 5 Ubicación del sol respecto a la hora del día para la ciudad de Bogotá [14].

5.2.2 | Inclinación (β)

El ángulo de inclinación, de un colector corresponde al ángulo formado por el plano de la horizontal y la superficie del colector, el cual se optimiza cuando este ángulo de incidencia es mínimo para aprovechar al máximo la radiación directa. En otras palabras el ángulo β corresponde al ángulo de inclinación desde el horizonte hasta el sol. Los módulos solares fotovoltaicos y los CSCA producirán la mayor cantidad de energía cuando el sol brille o incida directamente sobre ellos, desde un ángulo de 90°. Por lo tanto, para los dispositivos fijos el mejor ángulo de inclinación será el mismo que la latitud del lugar de la instalación. Para el caso de este colector se empleó un ángulo de inclinación de 62,83°, este valor fue configurado en SAM y aparece indicado como *Tilt* u *horizontal Tilt* [15].

5.2.3 | Localización y Recurso Renovable

Para obtener el nivel de radiación solar en [kWh/m^2] para Bogotá, se utiliza el visor web de la Base de datos nacional de radiación solar [16], que contiene no solo datos para los EE.UU., sino también para una lista creciente de países del mundo. Un resumen de estos conjuntos de datos internacionales se proporciona a continuación en la Tabla 6.

Región	México/Central América
Conjunto de datos	Modelo solar físico (PSM) V. 3.0
Resolución temporal	1/2 hora
Resolución espacial	4 x 4 km
Años cubiertos	1998-2019

TABLE 6 Modelo de recurso de datos solares usado por SAM [17].

El nivel de radiación mensual en la ciudad de Bogotá se encuentra en un rango que va desde los 3500 [Wh/m^2] hasta los 4800 [Wh/m^2], de acuerdo a lo estimado por el modelo de Perez et. al. [17, 18], por lo que debe revisarse en la simulación en SAM si la radiación solar incidente en Bogotá, es suficiente para que

el calentador funcione de forma satisfactoria (es decir, si la radiación logra calentar el agua que atraviesa el CSCA a una temperatura adecuada para su consumo doméstico).

Los datos disponibles se calcularon utilizando el Modelo Solar Físico (PSM) versión 3.0, el cual se detalla completamente en los trabajos de [17] y [18]. Para este trabajo, se introdujeron las coordenadas geográficas de Bogotá (4,61 °N y -74,1 °E). En la tabla 7 se muestran los resultados de los datos tomados del satélite para la ubicación del CSCA.

Tipo de Radiación / Otros Factores	Valor
Global Horizontal	4,81 $kWh/m^2/day$
Directa Normal (Beam)	3,7 $kWh/m^2/day$
Difusa Horizontal	2,5 $kWh/m^2/day$
Albedo Anual	0,136
Temperatura Promedio	17,2 [°C]
Elevación	2539 msnm

TABLE 7 Parámetros solares y climáticos para la ciudad de Bogotá D.C.

5.3 | Tanque e Intercambiador de Calor

Los componentes principales del tanque y sus parámetros deben ajustarse a las características del CSCA comercial seleccionado para este trabajo. Los datos básicos del tanque son la capacidad de almacenamiento, que en este caso es de 130 [l], la cantidad de tubos captadores es de 15, el área de apertura sobre metro cuadrado tiene un valor de 2,03. Los litros-día se encuentran entre 60 [°C] y 150 [°C] de consumo total en el tanque, considerando dentro de él, el intercambiador de calor. La información de la Tabla 8, resume las características del tanque y del intercambiador de calor del CSCA escogido [7].

5.4 | Bombeo y Tuberías

Para la selección de la bomba y el tipo de tubería a instalar, SAM requiere configurar parámetros como la longitud total de la tubería en el sistema cuyo valor en este caso se asume en 100 [m]. La potencia de la bomba se estima en 50 [W], el diámetro de la tubería de 0,01588 [m], la eficiencia de la bomba (η_b) es 0,85, la conductividad del aislamiento de la tubería de 0,03 [$W/m \cdot ^\circ C$], el espesor del aislamiento de la tubería de 0,006 [m] y, teniendo en cuenta que, la potencia de la bomba SAM la utiliza para cálculos de potencia parásitos (o de pérdidas), y no en la potencia calorífica transmitida.

En general, se deben incluir todas las bombas del sistema (una sola en este caso). Se asume que el tamaño de la bomba de entrada es lo suficientemente grande para impulsar todos los circuitos. Estos parámetros se modificaron en SAM para que el modelamiento del colector se ajuste lo mejor posible a la realidad y así los resultados sean acordes al tipo de colector seleccionado, considerando las condiciones ambientales y de radiación solar de la ciudad de Bogotá.

Material Tanque Externo	Acero Inoxidable pintado	e = 0,50 [mm]
Material Tanque Interno	Acero inoxidable SUS304-2B	e = 0,40 [mm]
Aislante Térmico	Poliuretano inyectado	e = 50 [mm]
Diámetro Tanque Externo	460 [mm]	
Diámetro Tanque Interno	360 [mm]	
Diámetro Tubería Entrada y Salida	1/2"	
Dispositivos opcionales	- Sensor de temperatura y nivel - Resistencia Eléctrica	

TABLE 8 Tanque principal de almacenamiento de agua caliente del CSCA [7].

5.5 | Modelo de CSCA Comercial

En este caso de estudio se tiene en cuenta un CSCA de circulación natural que trabaja básicamente por gravedad (aunque en el modelo se considera una bomba de 50 [W] como potencia parásita). Se usa típicamente en viviendas unifamiliares donde la utilización de agua caliente es sólo para cubrir las necesidades básicas del baño y la cocina, y provee una temperatura promedio de ACS a 50 [°C], en un volumen de aproximadamente 32 litros por persona, para un promedio de cuatro (4) personas por vivienda [7]. Las figuras 4 (a) y 4 (b) presentan las dimensiones y los componentes del CSCA simulado en este trabajo.

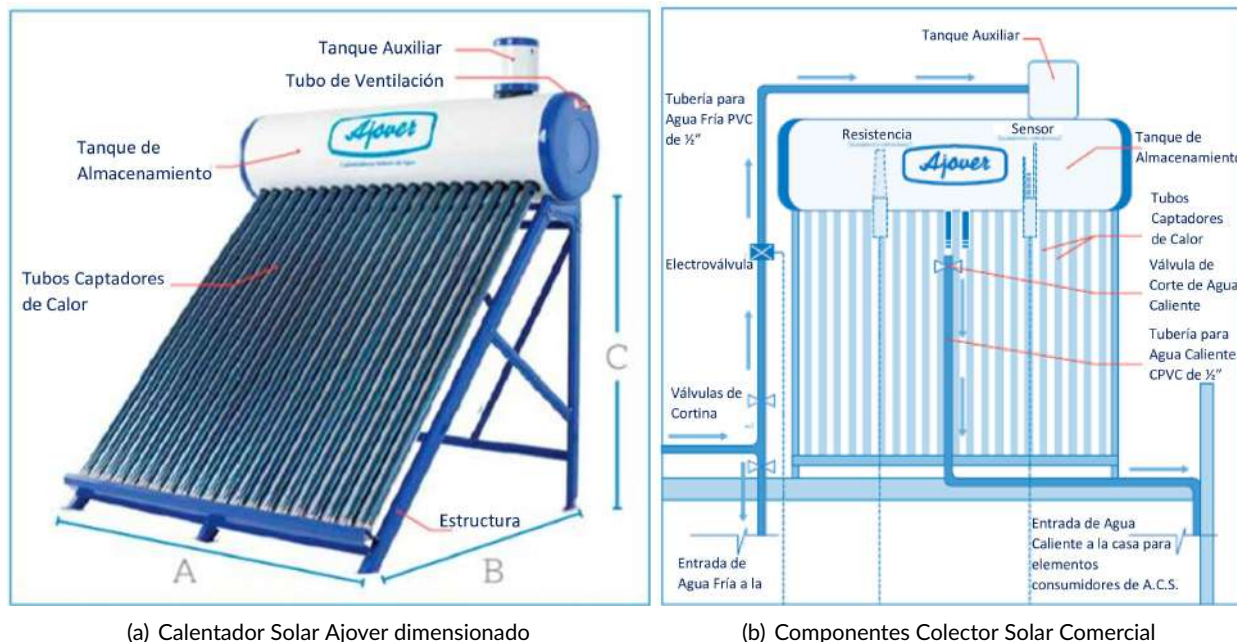


FIG. 4 Calentador Solar Comercial Simulado en SAM [7].

El CSCA seleccionado basa su funcionamiento en un sistema de tubos de captadores de calor [2], [7]. Este calentador cuenta con un tanque principal de almacenamiento de agua caliente de doble capa (ver figura 4), es decir, cuenta con un tanque de acero inoxidable ubicado al interior de otro tanque igualmente de acero inoxidable con un aislamiento térmico de poliuretano inyectado de un espesor de 50 [mm] entre sí. Las características físicas del CSCA comercial, para uso residencial unifamiliar se resumen en la Tabla 9. Los tubos son fabricados en vidrio de silicato de boro y tienen un diámetro interior de 47 [mm] y una longitud de 1800 [mm]. Son tubos de tipo doble capa concéntrica con un nivel de vacío de $\leq 5 \times 10^{-3}$ [Pa].

Volumen [l]	A [m]	B [m]	C [m]	Peso Vacío [kg]
80	0,8	2,1	0,75	35
130	1,3	2,1	0,75	60
180	1,6	2,1	0,5	85

TABLE 9 Dimensiones del CSCA seleccionado [7].

Las características operativas y algunas recomendaciones de instalación para este CSCA son presentadas en la Tabla 10.

Presión Máxima de trabajo	0 Bar - Por gravedad
Eficacia diaria	55 %
Fluido	Agua
Presión de entrada de agua fría	25 PSI - [lb/in2]
Material Tubería línea de entrada de agua fría sugerida	PVC RDE21
Material Tubería línea de salida de agua caliente sugerida	CPVC o Cobre
Temperatura de agua alcanzada con radiación directa (Día Soleado)	50 [°C]
Temperatura de agua alcanzada con radiación difusa (Día Nublado)	25 [°C]

TABLE 10 Parámetros operativos del CSCA Ajover [7].

6 | RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL CSCA CONSIDERANDO PERFILES DE ACS RESIDENCIALES

SAM simula tecno-económicamente el CSCA, siguiendo una lógica como la presentada en la Figura 5. En este artículo, el alcance de la simulación se limita a la comparación de los perfiles de ACS obtenidos, vs la cantidad de radiación incidente, el calor y las temperaturas en tuberías y tanque de almacenamiento. El análisis económico se considera como la siguiente etapa en esta investigación.

Para este caso de estudio, se crea un proyecto tipo *Solar Water Heating* y se configuran los datos de consumo de ACS para los tipos de hogares seleccionados, calculados por medio del macro de Excel, para así poder visualizar y comparar el consumo de ACS respecto a variables como la irradiancia, el calor útil, las temperaturas en la tubería y en el tanque del CSCA, entre otras.

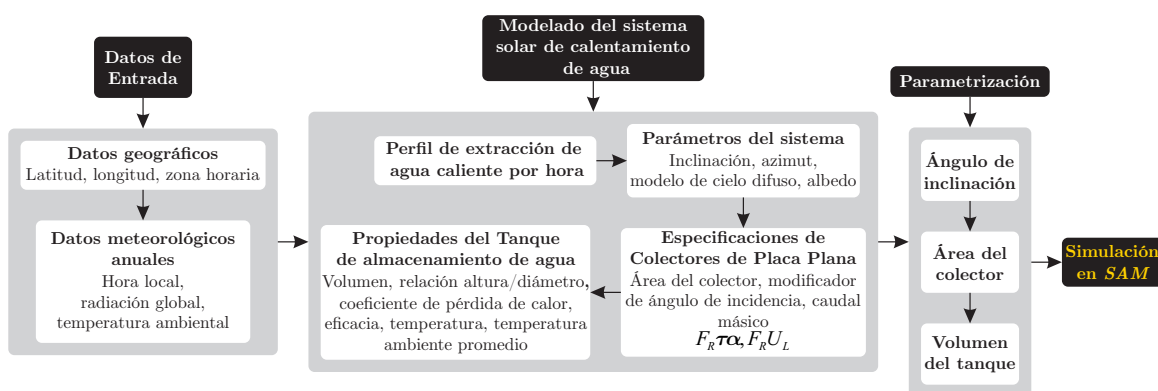


FIG. 5 Estructura de modelamiento en SAM.

Los perfiles de ACS para los cuatro tipos de hogares se presentan en la Figura 3, para los meses donde hay un mayor pico de consumo de ACS. Para el desarrollo y organización de los diferentes resultados se realizaron mediciones de secciones específicas de tiempo para cada uno de los cuatro tipos de hogares considerados, es decir, se escogieron los mismo periodos de tiempo al año para realizar la respectiva comparación de consumo y poder observar los diferentes cambios que influyen en los tipos de hogares, para así poder analizar y entender detalladamente cada uno de los cambios a lo largo del año, teniendo en cuenta variables que son necesarias para dichas comparativas como lo son las temperaturas (T), la energía calórica (Q), irradiancia (I), el volumen del ACS almacenada en el tanque (V) entre otros, los cuales se mostrarán en las siguientes secciones.

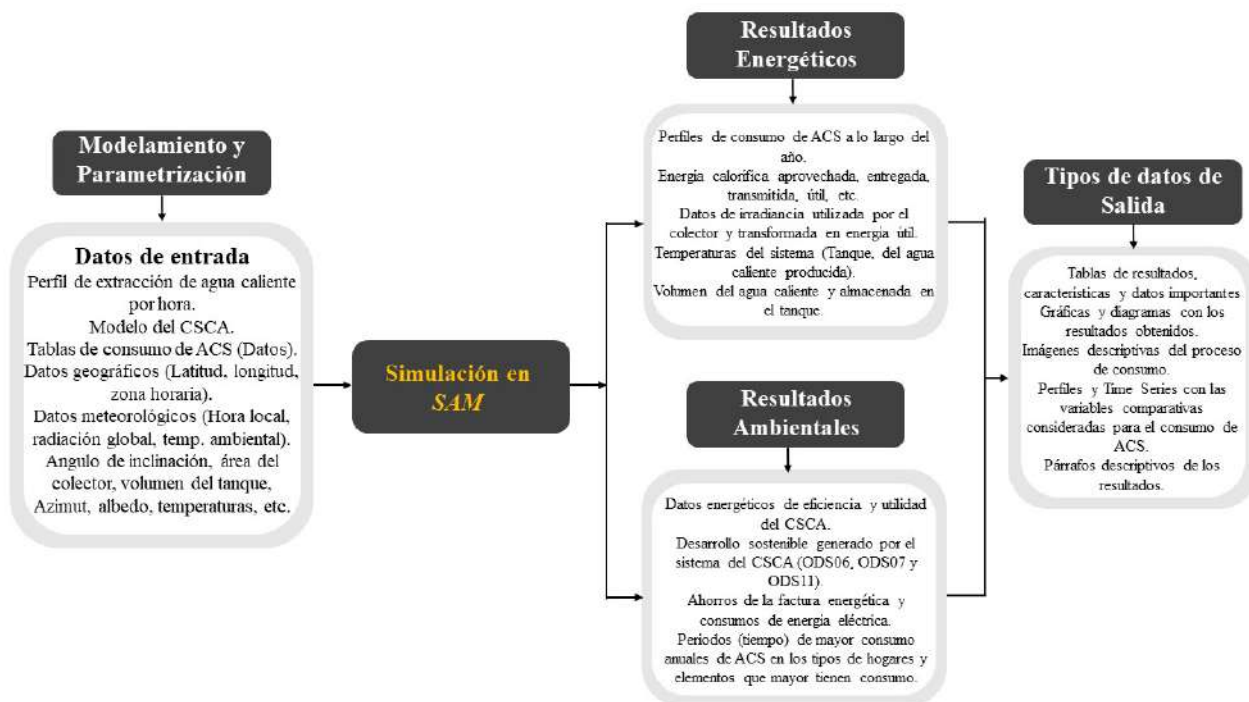


FIG. 6 Estructura de simulación y presentación de resultados en SAM

6.1 | Desempeño Energético del CSCA en el Hogar tipo 1

6.1.1 | Perfil de ACS vs Temperaturas, Calor y Energía del sistema generada por el CSCA

La Figura 7 presenta el perfil de ACS (DHW), las temperaturas del agua caliente (T_H) y del tanque (T_T), el calor entregado (Q_D), el transmitido (Q_{Tr}) y la energía generada por el CSCA (S_{PG}).

La información se presenta en forma de series de tiempo (*Time Series*), con esta se logra hacer comparaciones detalladas divididas en dos planos ordenados. En esta figura, en color azul está el perfil de consumo de ACS, en naranja la temperatura caliente generada por el colector y en rojo la temperatura del tanque.

Se puede observar que hay una correlación directa entre las temperaturas del tanque y del ACS, ambas con valores superiores a 20 [°C], esto debido a la cantidad de calor obtenido a partir de la irradiancia que absorbe el CSCA. Los picos de estas señales coinciden con picos de consumo de ACS que ocurrieron en este periodo de tiempo (aproximadamente un mes). Se puede observar que la variable de temperatura del ACS (naranja) desciende después de llegar a su pico de consumo, después de dicho uso, junto con la temperatura del tanque (roja), ambas se relacionan con el consumo de ACS que para el hogar tipo 1 presenta un valor promedio de 350 [kg/h].

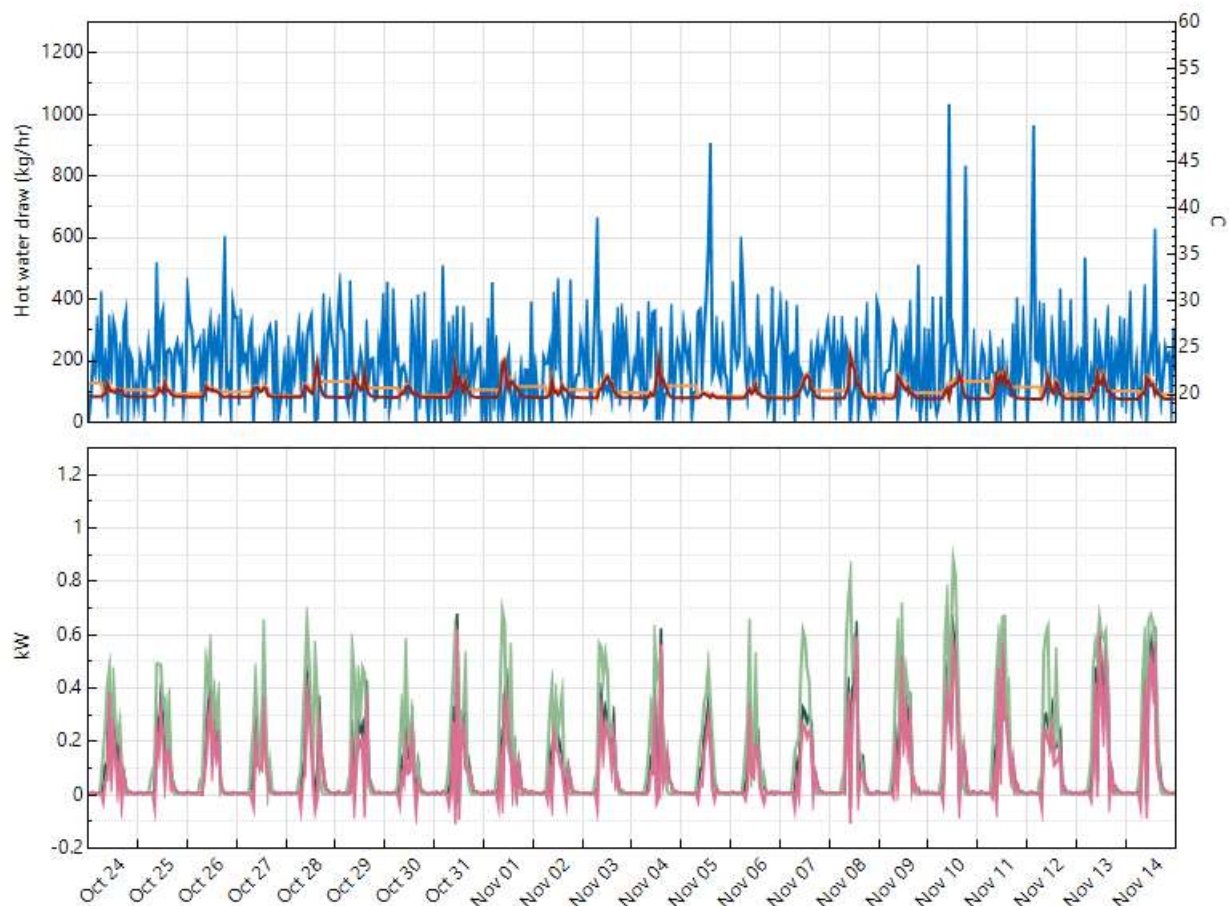


FIG. 7 Perfiles de consumo de ACS comparativos para hogar tipo 1 desde el 24 de Octubre hasta el 14 de Noviembre

Ahora bien, la gráfica inferior presenta en color verde oscuro el calor entregado (Q_D) que es siempre inferior al calor transmitido (Q_T) en verde claro y con un valor similar a la energía generada por el CSCA (S_{PG}), todas estas variables tienen valores instantáneos cercanos a los 0,5 [kW].

6.2 | Desempeño Energético del CSCA en el Hogar tipo 2

6.2.1 | Perfil de ACS vs Volumen del agua caliente, Irradiancia y Calor del sistema transmitido por el CSCA

La Figura 8 presenta el perfil de ACS (D), el volumen del agua caliente (V_H), la irradiancia transmitida (I_{Tr}), y el calor generado por el CSCA (Q_{Tr}), también en series de tiempo. La figura 8 muestra en color azul el perfil de consumo de ACS y en naranja el volumen del agua caliente producida por el CSCA.

Es posible observar los picos de producción de ACS del CSCA, es decir, aquí se refleja el proceso de calentamiento del ACS (naranja), durante estas amplitudes el colector solar se encarga de calentar cantidades volumétricas de agua aprovechada durante los siguientes minutos, horas o días, el pico de volumen es aproximadamente igual a 1300 [m^3] y el menor de casi 100 [m^3] durante el periodo de tiempo de abril 7 a 8, hasta el 11 de abril se presenta un aumento considerable y es en este periodo donde se consume el agua calentada por el primer pico. Mientras que las amplitudes de los picos del perfil de ACS (azul) se mantienen estables y muestran el consumo realizado en el hogar, se relacionan directamente con el volumen del tanque ya que muestran siempre picos estables de en promedio 300 [kg/h] durante esta semana, relacionándose directa-

mente el volumen del agua caliente con el consumo del ACS. Además, la gráfica 8 presenta en color verde oscuro la irradiancia transmitida (I_T) que se mantiene similar y hasta superpuesta del calor transmitido (Q_T) en rojo, ambas variables se correlacionan directamente ya que es la energía que absorbe el CSCA y la transmite en forma de calor para así permitir la calefacción del agua, mostrando como el colector emplea al máximo dicha radiación que incide directamente y la transmite correctamente evitando pérdidas, dichos picos se mantienen, llegando a lograr hasta $400 [W/m^2]$ de potencia incidente por unidad de superficie o irradiancia y $0,4 [kW]$ de potencia o calor transmitida para el calentamiento del ACS.

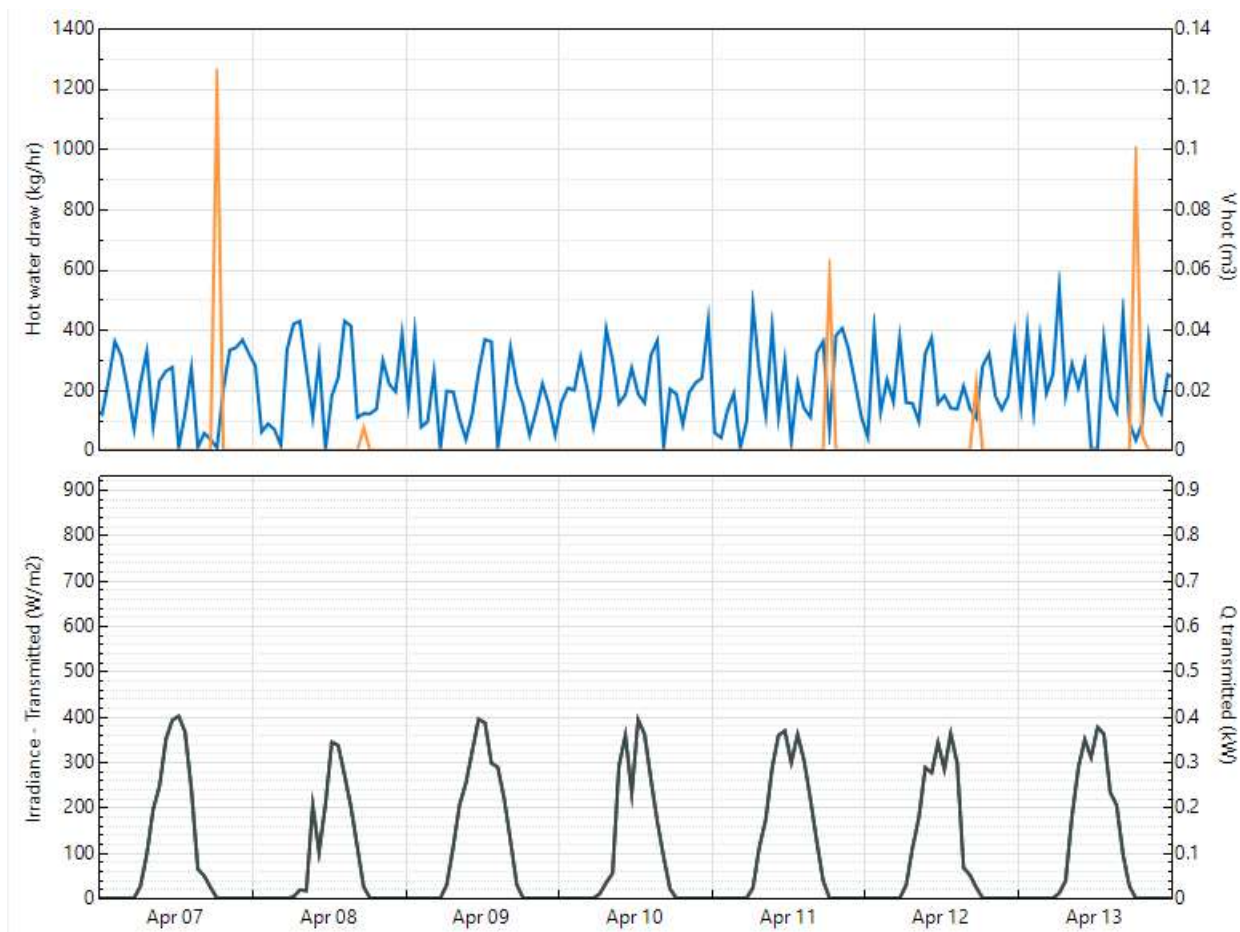


FIG. 8 Perfiles de consumo de ACS comparativos para hogar tipo 2 desde el 7 de Abril hasta el 13 de Abril

6.3 | Desempeño Energético del CSCA en el Hogar tipo 3

6.3.1 | Perfil de ACS vs Volumen del agua caliente, Irradiancia y Calor útil del sistema aprovechado por el CSCA

La Figura 9 presenta el perfil de ACS (DHW), el volumen del agua caliente (V_H), la irradiancia transmitida (I_{Tr}), y el calor útil por producido por el CSCA (Q_U). En esta figura, en color azul se presenta el perfil de consumo de ACS y en naranja el volumen del agua caliente producida por el CSCA.

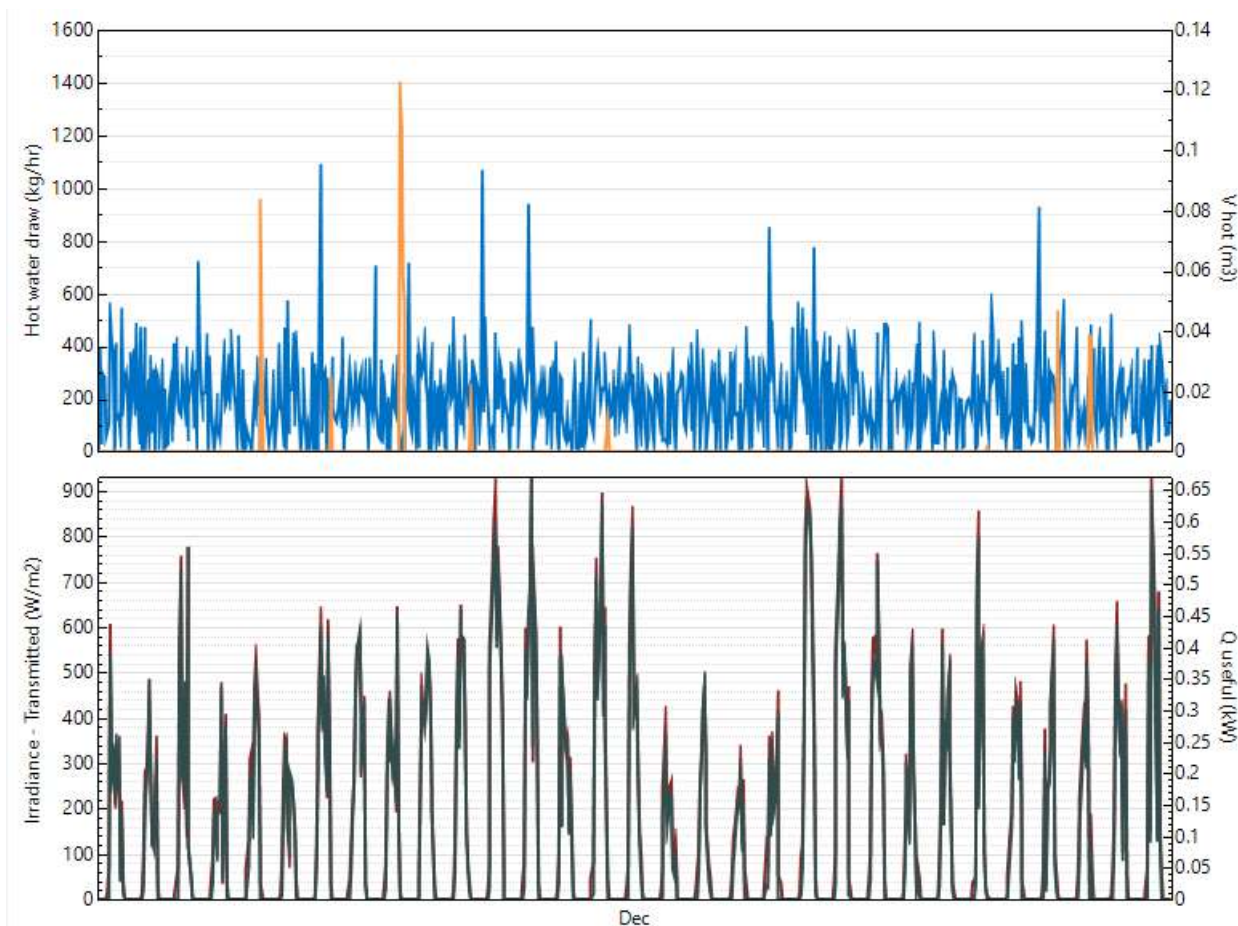


FIG. 9 Perfiles de consumo de ACS comparativos para hogar tipo 3 en el mes de Diciembre

Se logra divisar inicialmente picos elevados de consumo por parte del perfil de ACS (azul), dichos picos alcanzan una magnitud máxima de $1100 [kg/h]$, manteniéndose algunas amplitudes elevadas pero estables y en promedio de $500 [kg/h]$, relacionadas directamente con la cantidad volumétrica del agua caliente producida por el CSCA (naranja), ya que en los periodos de mayor producción del volumen del agua caliente aledaños al primer pico de aproximadamente $1400 [m^3]$ en naranja se encuentran los picos de mayor consumo de ACS en azul, es durante este periodo inicial del mes donde se encuentra el mayor gasto, ascienden de manera coordinada y descienden de la misma forma, mostrando así el tiempo y la cantidad del recurso empleado en el hogar durante el mes de diciembre.

La gráfica inferior de la Figura 9 presenta en color verde oscuro la irradiancia transmitida (I_T) que se mantiene similar y en algunos puntos hasta superpuesta al calor útil generado por el CSCA (Q_U) en rojo, es posible ver como se presenta una gran similitud entre estas dos variables, ya que al estar ambos en función de la energía se relacionan directamente, mostrando así amplitudes de la irradiancia que alcanzan una magnitud máxima de $900 [W/m^2]$ y un promedio de $450 [W/m^2]$, mientras que se alcanza un calor útil máximo de $0,65 [kW]$ y en promedio de $0,325 [kW]$.

6.4 | Desempeño Energético del CSCA en el Hogar tipo 4

6.4.1 | Perfil de ACS vs Irradiancia y Calor transmitidos, Temperatura caliente y del tanque para el sistema doméstico de calefacción por el CSCA

La Figura 10 presenta el perfil de ACS (DHW), la irradiancia transmitida (I_{Tr}), el calor transmitido (Q_{Tr}), las temperaturas del agua caliente (T_H) y la del tanque (T_T). En esta figura, en color azul está el perfil de consumo de ACS y en naranja la irradiancia transmitida por el sistema del CSCA.

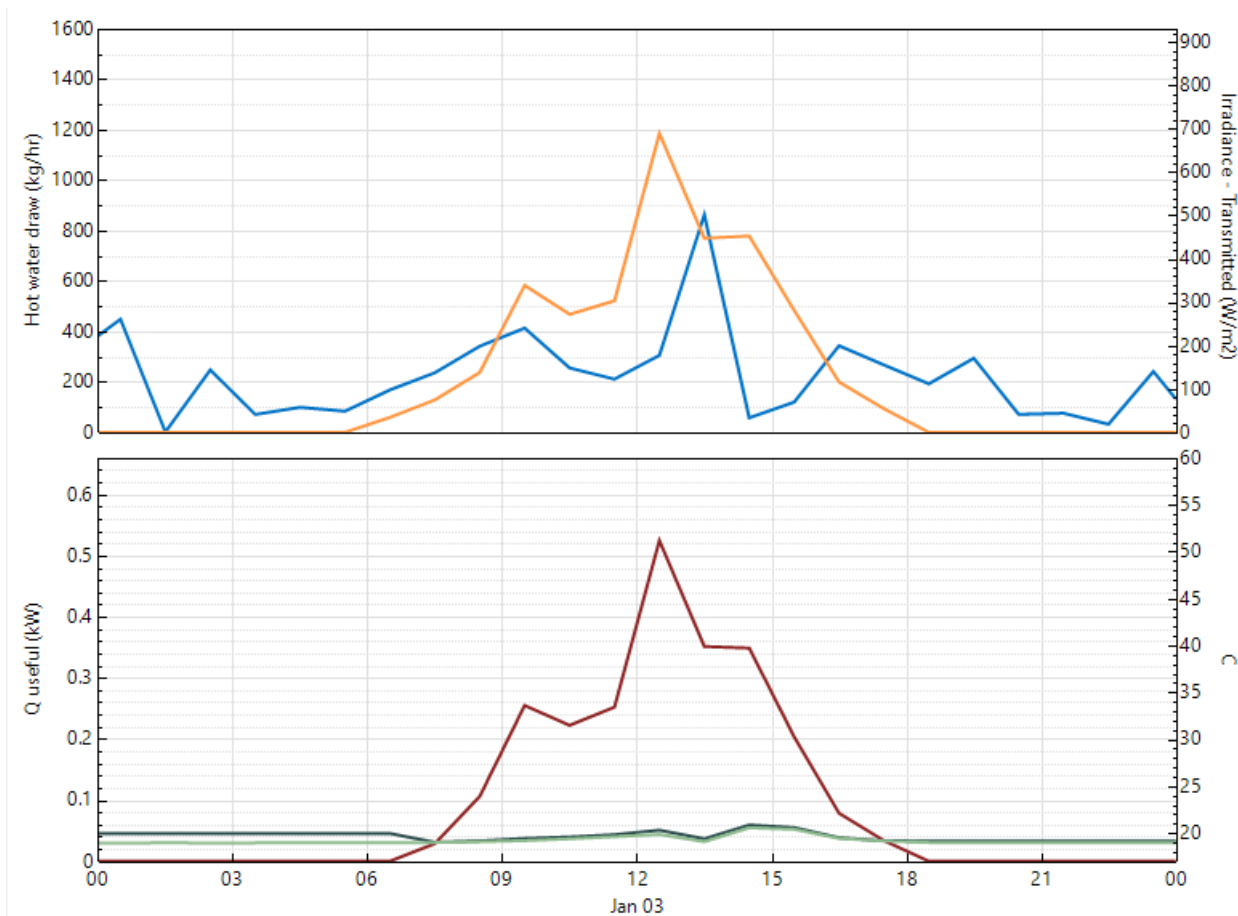


FIG. 10 Perfiles de consumo de ACS comparativos para hogar tipo 4 en Enero 3

Esta gráfica permite un análisis a detalle del proceso de calefacción del ACS, se logra divisar en la gráfica cómo se presenta un modelo para el día 3 de enero del sistema de consumo del agua caliente comparando con el proceso de transformación de la energía, por un lado se tiene en color azul el perfil de consumo de ACS y por otro lado en naranja la irradiancia transmitida por el CSCA para calentar el agua que será empleada en el hogar, analizando la figura se observa como directamente se relacionan dichas variables, ya que muestran el aumento y descenso continuo de las magnitudes coordinadamente, esto se debe a que el proceso de calentamiento del agua que ocurre dentro del colector es el siguiente, el agua almacenada dentro del tanque y los tubos del colector se calienta directamente allí, mientras el perfil de consumo aumenta, debe igualmente hacerlo la irradiancia transmitida, ya que se necesita transformar la energía incidente en el colector o la radiación para calentar el agua, de esta forma automáticamente el CSCA comienza a calentar el agua que será usada en dicho momento, generándose este pico de consumo al mediodía de 900 [kg/h] en azul con promedio de 450 [kg/h], antecedido del pico de irradiancia transmitida de 700 [W/m²] en naranja con promedio de 350 [W/m²],

se logra estudiar como comienza en aumento el perfil de ACS y luego de esto superado por la irradiancia, ubicándose bajo la curva de esta, esto se presenta en los picos de mayor consumo donde requiera un aumento considerable de la energía transmitida para calentar el agua y ser gastada, estos picos altos usualmente por el uso de la ducha y el fregadero de la cocina, los cuales son los que consumen en mayor cantidad y tiempo el ACS. En el plano inferior de la Figura 10 se presenta, en rojo, el calor útil aprovechado por el CSCA (Q_U) que como se puede observar es similar y acorde a la irradiancia transmitida de la parte superior de la gráfica (I_{Tr}), en verde claro la temperatura del tanque (T_T) y en verde oscuro la temperatura del agua caliente generada por el CSCA (T_H), la variable de calor útil representada como la energía o el calor viable que incide y es empujado por el calentador es similar a la irradiancia transmitida ya que representa en magnitudes de potencia la cantidad de energía empleada para calentar el agua, la cual alcanza para enero 3 un pico máximo al mediodía de $0,54 [kW]$ aproximadamente, con un promedio de $0,27 [kW]$, mientras que las temperaturas reflejadas bajo la curva del calor útil superan los $20 [^{\circ}C]$ aproximadamente, tanto la temperatura almacenada dentro del tanque, como la temperatura que ha sido previamente calentada por el sistema del CSCA, aumentando coordinadamente con los picos de consumo y energía.

7 | CONCLUSIONES

Gracias a la adaptación sistemática y organizada de la hoja de cálculo para el consumo de ACS, en conjunto con el software de simulación, se logró la obtención de resultados confiables y que justifican la importancia de los CSCA en un entorno doméstico en la ciudad de Bogotá. Se generaron diferentes perfiles de consumo en una amplia variedad de escenarios logrados por las gráficas de consumo, demostrando y ejemplificando el tipo de gasto y la cantidad empleada de ACS para su uso, utilizando adecuadamente los modelos físicos explicados en las Secciones 2 y 3.

Por medio de este proceso de análisis, con los perfiles de ACS, se logra evidenciar que existe un cambio de los hábitos de consumo en los diferentes tipos de hogares considerados, generándose diferentes perfiles dependiendo de las variables consideradas como son, por ejemplo, el tiempo de uso o gasto del ACS, la forma de uso, los periodos del año en los que hay un mayor consumo. Igualmente, se puede observar que las duchas y los lavaplatos son los mayores consumidores del ACS y generan picos bastante elevados que repercute directamente en una mayor producción de energía calorífica para el CSCA, como se evidencia en el pico elevado de la Figura 10. Adicionalmente, en esta investigación se puede evidenciar la aleatoriedad de los perfiles de consumo, pues nunca se consume la misma cantidad de ACS durante el día ni tampoco se producen perfiles similares para los 4 tipos de hogares, como se muestra en la figura 3. Sin embargo el uso de ACS aumenta de un tipo de hogar a otro, considerándose un aumento de consumo en promedio del 10% a 30% dependiendo el periodo del año y tipo de elemento de consumo que se utilice, como se evidencia en los picos de la Figura 7 y 9.

La inspiración principal de este trabajo se enmarca en el Desarrollo Sostenible y considera un impacto positivo para el medio ambiente, el hecho de usar energía solar térmica en lugar de eléctrica para calentar agua de uso doméstico. Está basando en 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promulgados por la ONU [19] como son el ODS06 (Agua limpia y saneamiento), el ODS07 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS11 (Ciudades y comunidades sostenibles). Considerando que el consumo de energía promedio de una ducha eléctrica en una hora es de $4,5 [kWh]$ aproximadamente, y que en promedio, el tiempo que tarda una ducha es de 15 minutos, se consumen diariamente por concepto de ACS cerca de $1,125 [kWh]$, lo que en un año sería equivalente a $1,125 kWh \times 365 dias = 410,6 kWh - ao$. Ahora bien, el colector solar produce $417 [kWh]$ de energía calorífica útil en el primer año, para un hogar tipo 4. Lo que indica que prácticamente el consumo de energía eléctrica puede ser reemplazado por el CSCA comercial aquí simulado. El ahorro en la factura de energía, considerando un precio por kilovatio hora de $541,82 \$COP/kWh$ en el primer año sería de aproximadamente $222.500 \$COP$.

Gracias a este sistema doméstico de calefacción del agua, se logra cumplir con lo propuesto en los ODS de la ONU [19] para el aprovechamiento del ACS, como por ejemplo, el acceso a energías no contaminantes y al agua potable.

Adicionalmente, con la situación actual de pandemia causada por el COVID-19, que ha puesto de manifiesto la importancia de la higiene para prevenir y contener el contagio, el acceso a agua caliente potable y limpia se considera fundamental en esta lucha.[19]

Otro aspecto a considerar es el ahorro de la energía eléctrica, pues la mayor parte (incluso la totalidad) del consumo energético para el proceso de calentamiento de agua, se hace mediante un tipo de energía renovable, como lo es la solar térmica.

Por medio de esta investigación se obtuvieron perfiles de consumo de ACS para cuatro tipos de hogares de la ciudad de Bogotá, considerando aspectos como los hábitos de uso, el tiempo de uso y el número elementos consumidores de ACS. Este perfil gráfico y tabular anual, es útil para determinar cuando se presentan los mayores consumos de ACS, analizar la relación entre la Irradiancia Total Transmitida y las variables Termodinámicas del CSCA, como por ejemplo las Temperaturas, el Calor Útil, etc. Así como comparar estas cantidades con los perfiles de consumo de ACS para así analizar el desempeño del CSCA ante un consumo de ACS particular.

Al respecto se puede concluir por ejemplo que, el consumo de agua caliente presenta su periodo de máximo de uso entre las 4:00 hasta las 8:00 *a.m.* en las mañanas, en el medio día y la tarde desde las 11:00 *a.m.* hasta la 1:00 *p.m.* y en la noche de 6:00 a 9:00 *p.m.*, manteniéndose una temperatura máxima de aproximadamente 32 [°C], tanto del agua caliente a la salida del CSCA, como de la almacenada en el tanque. Adicionalmente, se puede evidenciar que los picos máximos de consumo causados usualmente por la ducha y el lavaplatos están en promedio entre los 1000 y 1300 [kg/h] como se evidencia en la Figura 10, mientras que los picos producidos por el lavamanos se encuentran entre los 200 y 700 [kg/h] visibles en la Figura 8. Los valores o picos adicionales se deben al tiempo de uso del ACS, ya sea para labores de limpieza en el hogar, lavado del auto o cualquier otro tipo de gasto en que se haya decidido emplear agua caliente.

En lo que respecta al CSCA, fue posible analizar su eficiencia en el calentamiento del ACS, evidenciándose que en todos los casos el aprovechamiento del calor transmitido es máximo, disminuyendo así las pérdidas asociadas al calor y a la radiación, tanto directa, como difusa o de albedo, alcanzando un promedio energético calorífico de entre 0,25 [kW] a 1 [kW] como se puede observar en la parte inferior de la Figura 10, respecto a una Irradiancia Total Incidente entre los 200 y los 1000 [W/m²]. Gracias a la adaptación de la hoja de cálculo, fue posible realizar un análisis completo y detallado, tanto de los elementos consumidores de ACS más adecuados al caso colombiano, para los cuatro tipos de viviendas unifamiliares de la ciudad de Bogotá, así como del desempeño energético del CSCA, mostrando su viabilidad, para el uso en el suministro de ACS residencial, aprovechando un tipo de energía renovable como lo es la solar térmica.

Como futuras líneas de investigación se pueden considerar el análisis de sombreado sobre el CSCA y su desempeño energético asociado, como es propuesto en el trabajo de [20], también se debe realizar el análisis comparativo anual de los perfiles de ACS para determinar si las variaciones mensuales son consistentes con los hábitos de consumo de agua caliente en el país.

References

- [1] A. Jamar, Z. Majid, W. Azmi, M. Norhafana, and A. Razak, "A review of water heating system for solar energy applications," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 178 – 187, 2016.
- [2] G. Tiwari and A. T. Shyam, "Handbook of solar energy," 2016. Theory, Analysis and Applications.
- [3] A. L. Skai Edwards, Ian Beausoleil-Morrison, "Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems, solar energy." web, 7 2015.
- [4] 2012 World Renewable Energy Forum, *A Realistic Hot Water Draw Specification for Rating Solar Water Heaters*, no. NREL/CP-5500-54539, (Denver, Colorado), Department of Energy, May 2012.
- [5] J. Burch and C. Christensen, "Toward development of an algorithm for mains water temperature," American Solar Energy Society Annual Conference, 2007.

- [6] R. Hendron and J. Burch, "Development of standardized domestic hot water event schedules for residential buildings," in *Energy Sustainability*, no. NREL/CP-550-40874, pp. 1 – 12, Department of Energy, NREL, June 2007.
- [7] Ajover S.A., *Manual calentador solar de agua Ajover*. Ajover S.A.S, Bogotá, Colombia. MA:01-ES-CS-280, 06 ed., 03 2016.
- [8] R. American Society of Heating and A.-C. Engineers, *ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications, SI Edition*. ASHRAE, 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329, 11 ed., 05 2015.
- [9] NREL - National Renewable Energy Laboratory, *Manual Release SAM Version 2020.11.29*. Alliance for Sustainable Energy, LLC, U.S. Department Of Energy, 11 ed., 05 2021.
- [10] N. DiOrio, C. Christensen, J. Burch, and A. Dobos, *Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model*. NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 03 2014.
- [11] A. R. Guevara Umaña, "Análisis de prefactibilidad técnica y económica para un sistema híbrido de energía renovable para la sede p," Master's thesis, 2021.
- [12] H. Rodríguez, "Instalaciones termosolares para la producción de agua caliente sanitaria (ACS)." web, 3 2020.
- [13] Department of Energy (DOE), *Standard DHW Event Schedules*. Alliance for Sustainable Energy, LLC. All Rights Reserved, NREL Technology Transfer Office at 303-275-3053, 05 2014.
- [14] Sun and E. Tools, "Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento." url-https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es#top.
- [15] T. Cruz, R. Schaeffer, A. F. Lucena, S. Melo, and R. Dutra, "Solar water heating technical-economic potential in the household sector in brazil," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1618–1639, 2020.
- [16] NREL, "National solar radiation database." web, 11 2019.
- [17] R. Perez, P. Ineichen, M. Kmiecik, K. Moore, D. Renne, and R. George, "Producing satellite-derived irradiances in complex arid terrain," *Solar Energy*, vol. 77, no. 4, pp. 367 – 371, 2004. The American Solar Energy Society's Solar 2003 Special Issue.
- [18] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George, and F. Vignola, "A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation," *Solar Energy*, vol. 73, no. 5, pp. 307 – 317, 2002. DOI: [10.1016/S0038-092X\(02\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00122-6)
- [19] Organización de las Naciones Unidas - ONU, "Objetivos de Desarrollo Sostenible." url<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [20] D. Nolasco and J. S. Solís-Chaves, "Shading simulation for two photovoltaics solar generation residential systems (spv) using sam (system advisor model)," *TECCIENCIA*, vol. 16, p. 15–34, Feb. 2021. DOI: [10.18180/tecciencia.2021.30.2](https://doi.org/10.18180/tecciencia.2021.30.2)

A | TEMPERATURAS CONSIDERADAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PERFILES DE ACS

El macro de Excel [13], emplea los promedios mensuales de las temperaturas para realizar cálculos precisos del consumo de ACS a lo largo del año, en este caso se tuvo en cuenta las temperaturas promedio para todos los meses del año 2017 para la ciudad de Bogotá, este usa temperaturas en °F, por lo que fue necesario realizar la conversión a [°C], para poder determinar las temperaturas que mantendrá el CSCA, manteniéndose en media de 13,6 [°C], la temperatura de la tubería de ACS igual 16,96 [°C] y una suma total de 6192,20 grados por día al mes, como se observa en la Tabla 11.

TABLE 11 Temperaturas promedio mensual y anual para cálculos de consumo de ACS (f_{hot}) para la ciudad de Bogotá.

Mes	Temperatura del ambiente °C	Cálculo de la temperatura de la tubería promedio anual		
		Temperatura de la tubería °C	Días del mes	Grados-días
1	13,0	16,595	31	514,4
2	13,5	16,567	28	463,9
3	14,0	16,642	31	515,9
4	14,5	16,798	30	504,0
5	14,0	16,997	31	526,9
6	14,0	17,185	30	515,6
7	13,0	17,315	31	536,8
8	13,5	17,351	31	537,9
9	13,5	17,285	30	518,6
10	13,5	17,134	31	531,2
11	13,5	16,937	30	508,1
12	13,5	16,746	31	519,1
Promedios anuales	13,6	16,96		6192,20

En la primera columna de esta tabla se consignan los meses del año, en la segunda están las temperaturas ambiente promedio (T_A) en [°C], en la tercera se encuentran las temperaturas promedio de las tuberías (T_{Tub}) del CSCA para cada mes en [°C], en la cuarta están la cantidad de días que posee cada mes y en la última columna se encuentran los grados-días de cada mes, los resultados de esta columna son la multiplicación de la columna de temperaturas de la tubería por los días del mes, esto se emplea para calcular los diferentes resultados de consumo de ACS para los cuatro tipos de residencias (el flujo f_{hot}) para la ciudad de Bogotá.

B | RESUMEN DE LOS RESULTADOS ENERGÉTICOS PARA EL CSCA INSTALADO EN LOS TIPOS DE HOGARES CONSIDERADOS

SAM presenta un resumen de los resultados energéticos más relevantes de la simulación para el primer año de vida del proyecto. En las Tablas 12 a 15 se muestran estos resultados para cada uno de los cuatro tipos de hogares considerados:

Parámetro	Valor
Ahorro de energía anual (año 1)	432 [kWh]
Fracción solar (año 1)	0,01
Aux con solar (año 1)	80.282,6 [kWh]
Aux sin solar (año 1)	80.860,6 [kWh]
Factor de capacidad (año 1)	8,6 %

TABLE 12 Resumen de Parámetros Energéticos del CSCA del hogar tipo 1.

Parámetro	Valor
Ahorro de energía anual (año 1)	392 [kWh]
Fracción solar (año 1)	0,00
Aux con solar (año 1)	88.930,8 [kWh]
Aux sin solar (año 1)	89.466,5 [kWh]
Factor de capacidad (año 1)	7,8 %

TABLE 13 Resumen de Parámetros Energéticos del CSCA del hogar tipo 2.

Parámetro	Valor
Ahorro de energía anual (año 1)	393 [kWh]
Fracción solar (año 1)	0,00
Aux con solar (año 1)	89.065,0 [kWh]
Aux sin solar (año 1)	89.602,0 [kWh]
Factor de capacidad (año 1)	7,8 %

TABLE 14 Resumen de Parámetros Energéticos del CSCA del hogar tipo 3.

Parámetro	Valor
Ahorro de energía anual (año 1)	394 [kWh]
Fracción solar (año 1)	0,00
Aux con solar (año 1)	91.116,8 [kWh]
Aux sin solar (año 1)	91.654,5 [kWh]
Factor de capacidad (año 1)	7,8 %

TABLE 15 Resumen de Parámetros Energéticos del CSCA del hogar tipo 4.