



Interreg

España - Portugal

0029_SECASOL_5_E



UNIÓN EUROPEA
UNIÃO EUROPEIA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

Produto do Projecto n.º 11 (PP11)

Ferramenta para simulação numérica de secadores solares térmicos de concentração aplicados ao sector da depuração de águas residuais

POCTEP 2014-2020 / Projecto nº : 0029_SECASOL_5_E
Início do projecto: 01/12/2017
Duração do projecto: 37 meses

Projecto SECASOL	
Fomento de tecnologías innovadoras para la mejora de la eficiencia en el proceso de secado de los lodos de Aguas Residuales y de secado de Residuos Sólidos Urbanos mediante el uso de Tecnologías Solares en Andalucía-Algarve-Alentejo	
Data de entrega	23/12/2020
Parceiro responsável	LNEG
Pessoa responsável	João Cardoso
Autor(es)	João Cardoso
Revisto por	David Loureiro
Grau de disseminação	Público

Índice

1. Introdução	5
2. Simulação do desempenho energético de um secador de lamas de ETAR alimentado por energia solar térmica	6
2.1. Plataforma de modelação e simulação	8
2.2. Modelo de simulação	8
2.2.1. Meteorologia.....	10
2.2.2. Campo solar.....	11
2.2.3. Sistema de armazenamento de energia térmica	12
2.2.4. Sistema de apoio	13
2.2.5. Secador de lamas	14
2.2.6. Circuito hidráulico	16
2.2.7. Sistema de controlo	18
2.2.8. Resultados	18
3. Parâmetros a definir pelo utilizador	20
4. Conclusões.....	22
Referências.....	23

Lista de Figuras

Figura 1 – Configuração base do sistema considerado no desenvolvimento do modelo.....	6
Figura 2 – Diagrama de princípio do sistema modelado.....	7
Figura 3 – Visualização gráfica do modelo desenvolvido no programa TRNSYS.....	9
Figura 4 – Imagem ilustrativa do espeto gráfico do ficheiro de texto contendo dados mensais resultantes de uma simulação anual.	19

Lista de tabelas

Tabela 1 – Componentes utilizados na implementação do modelo.....	9
Tabela 2 – Parâmetros a definir pelo utilizador.....	20

1. Introdução

Os processos de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) resultam na (co-)incineração ou na deposição final em aterro sanitário controlado de uma grande quantidade de resíduos. Estes apresentam teores de humidade não desprezáveis que reduzem a viabilidade económica do processamento por co-incineração, representam um acréscimo à massa e volume de material a depositar em aterro e potenciam a ocorrência de lixiviados. Por seu lado, os processos de tratamento das águas residuais resultam na produção de lamas com uma elevada percentagem de humidade que limita a sua valorização agrícola ou energética e eleva os custos com o seu tratamento, nomeadamente ao nível do transporte. A secagem destes resíduos assume assim interesse económico e ecológico, permitindo a sua valorização, uma redução de custos com o processo de deposição e tratamento final e a redução da massa e volume de material a tratar [1-2].

O projeto SECASOL pretende fomentar e apoiar o desenvolvimento de soluções renováveis baseadas em energia solar térmica de concentração (CST) aplicadas aos sectores do tratamento de resíduos sólidos urbanos e do tratamento de águas residuais urbanas, nomeadamente nos processos de secagem existentes nesses sectores.

Para tal desenvolve um conjunto ações agrupadas em seis conjuntos de atividades – uma dedicada à gestão e coordenação do projeto (Atividade 5), outra dedicada à comunicação das ações e resultados do projeto SECASOL (Atividade 6) e outras quatro dedicadas à realização de atividades de índole técnica, intituladas:

Atividade 1 – Análise do estado da arte da investigação, desenvolvimento técnico e inovação;

Atividade 2 – Capacidades da cadeia de valor dos sectores da depuração de águas residuais, tratamento de resíduos sólidos urbanos e energia solar térmica;

Atividade 3 – Estudo de barreiras, sinergias e benefícios;

Atividade 4 – Validação de protótipos.

Um dos objetivos da Atividade 4 do projeto SECASOL é o desenvolvimento de um modelo computacional que permita a simulação de um sistema de secagem de escala industrial alimentado por energia solar térmica, proveniente de coletores concentradores, aplicado ao sector da depuração de águas residuais ou do tratamento de resíduos sólidos urbanos.

Desta forma, foi desenvolvido um modelo de simulação com o programa TRNSYS focado na operação de um sistema de secagem de lamas de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) alimentado por energia solar térmica. Pretende-se que este modelo contribua para facilitar a realização de estudos de análise do potencial ou pré-viabilidade técnica da implementação de sistemas de secagem de lamas de ETAR com energia solar térmica proveniente de coletores concentradores.

O presente documento descreve de forma abreviada o modelo, apresenta os parâmetros e variáveis de entrada que o utilizador terá de fornecer e identifica o tipo de resultados que podem ser obtidos.

2. Simulação do desempenho energético de um secador de lamas de ETAR alimentado por energia solar térmica

Os sistemas de secagem de lamas de ETAR alimentados por energia solar térmica podem apresentar diversas configurações. Para o desenvolvimento deste modelo de simulação foi selecionada uma instalação com uma configuração derivada da instalação protótipo desenvolvida pelo CENTA em Sevilha no âmbito da Atividade 4 deste projeto [3].

A instalação do CENTA possui uma configuração com algumas especificidades decorrentes do facto de ser uma instalação experimental concebida com o objetivo de demonstrar a viabilidade do conceito desenvolvido no âmbito do projeto – secagem de lamas de depuração em secadores convectivos de operação contínua com calor fornecido por coletores solares térmicos de concentração. Como tal, aquela instalação não possui alguns equipamentos que poderiam ser expectáveis numa instalação industrial, como um sistema de apoio para o fornecimento de calor em complemento do campo solar.

De modo a obter um modelo mais representativo de uma aplicação industrial considerou-se um sistema com uma configuração alternativa que pode ser dividida em quatro subsistemas principais (Figura 1): campo solar; sistema de armazenamento de energia térmica; caldeira auxiliar (sistema de apoio) e secador.

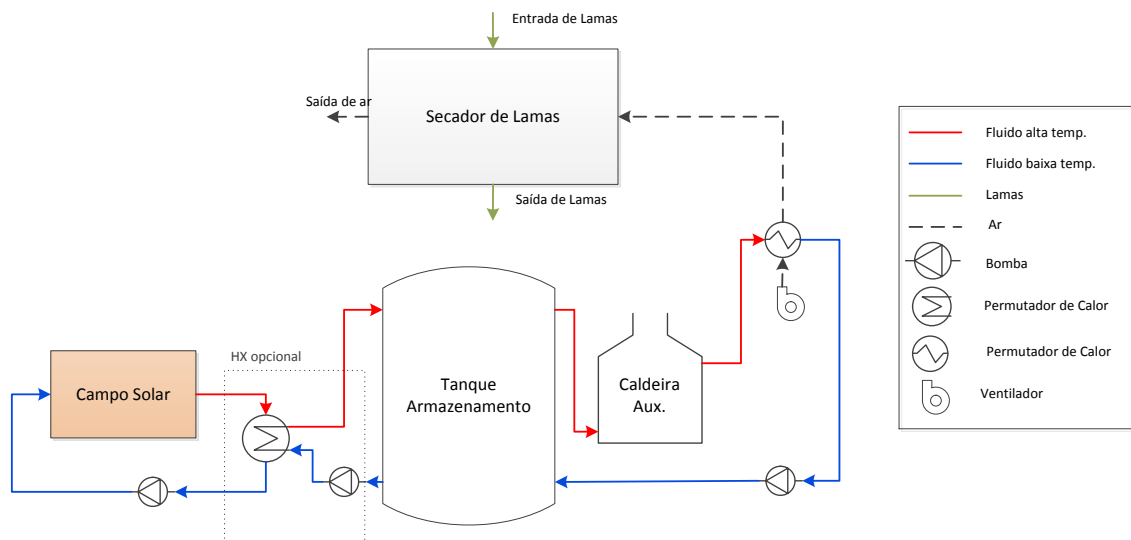


Figura 1 – Configuração base do sistema considerado no desenvolvimento do modelo.

A implementação à escala industrial deste conceito poderá resultar num conjunto diverso de circuitos hidráulicos, em particular no que respeita à integração do sistema de armazenamento de energia térmica que pode assumir três configurações: a) integração direta; b) integração indireta; c) ausência de armazenamento.

Para aumentar a flexibilidade do modelo, considerou-se a possibilidade de utilização de um campo solar composto por uma das seguintes tecnologias de conversão da radiação solar: a)

coletores planos ou de tubo de vácuo; b) coletores cilindro-parabólicos; c) coletores do tipo refletor Fresnel linear.

A Figura 2 apresenta o diagrama de princípio do sistema modelado. No que respeita à integração do sistema de armazenamento de energia, o sistema modelado apresenta uma complexidade superior à que será encontrada numa instalação real, uma vez que considera as três possibilidades de integração do sistema de armazenamento num único sistema. Tal dota o modelo de maior flexibilidade, permitindo ao utilizador uma maior liberdade na definição da instalação a simular. Embora o diagrama represente o sistema de apoio em série com o tanque de armazenamento, o modelo permite a sua inativação pelo que é possível simular sistemas alimentados exclusivamente por energia solar térmica.

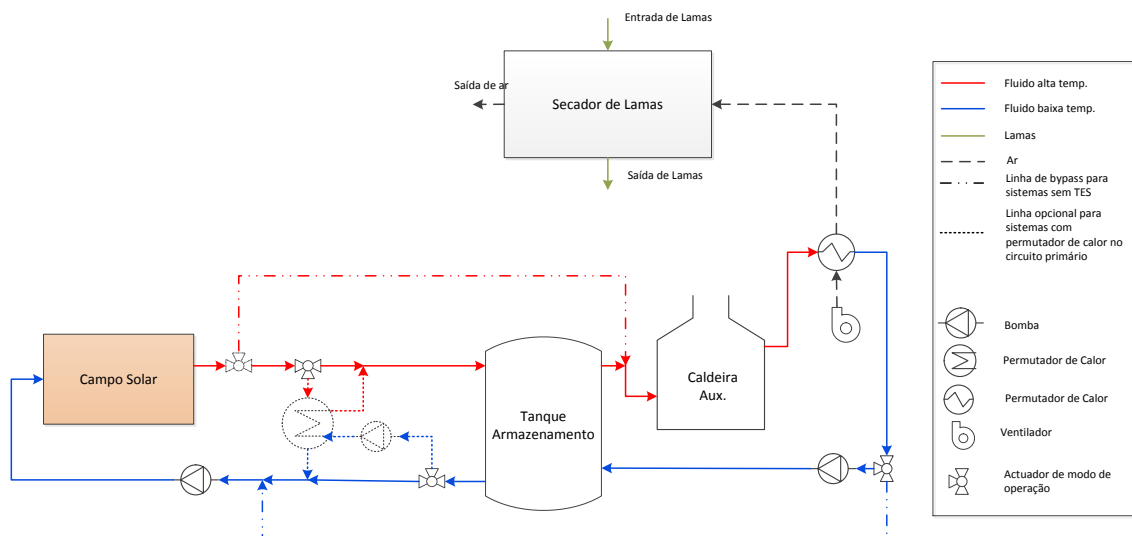


Figura 2 – Diagrama de princípio do sistema modelado.

O modelo desenvolvido permite a simulação de instalações com as seguintes configurações:

- Sistema de secagem alimentado exclusivamente por energia solar térmica sem armazenamento de energia;
- Sistema de secagem alimentado exclusivamente por energia solar térmica com armazenamento de energia de integração direta;
- Sistema de secagem alimentado exclusivamente por energia solar térmica com armazenamento de energia de integração indireta (permutador de calor externo);
- Sistema de secagem alimentado por energia solar térmica, com sistema de apoio e sem armazenamento de energia;
- Sistema de secagem alimentado por energia solar térmica, com sistema de apoio e armazenamento de energia de integração direta;
- Sistema de secagem alimentado por energia solar térmica, com sistema de apoio e armazenamento de energia de integração indireta (permutador de calor externo).

2.1. Plataforma de modelação e simulação

O programa computacional TRNSYS [4] foi selecionado como plataforma para o desenvolvimento e implementação do modelo de simulação. Este programa consiste num ambiente de simulação completo e extensível apto à simulação transiente de sistemas de energia. Completo, pois contém todos os elementos de base necessários à simulação do desempenho temporal do sistema a modelar. Extensível, pois, apresenta uma estrutura modular de acesso aberto que permite a adaptação de elementos existentes ou a inclusão de novos elementos programados pelo utilizador.

O desenvolvimento de um modelo de simulação em TRNSYS consiste na decomposição do sistema a modelar num conjunto de elementos base, designados por componente ou *Type*, e na descrição das interligações entre elementos do sistema, ou seja, a descrição dos fluxos de informação passada entre componentes. Os componentes consistem em rotinas computacionais que implementam o modelo físico ou matemático dos diversos elementos do sistema a modelar. Recebem informação sob a forma de variáveis de entrada (que podem variar ao longo da simulação) ou de parâmetros (que se mantêm fixos ao longo de toda a simulação) e produzem um conjunto de variáveis de saída em função dos parâmetros e variáveis de entrada e respetivo modelo matemático. Em cada passo de tempo da simulação as rotinas dos componentes são executadas sequencialmente de forma iterativa – após todas as rotinas serem executadas o programa verifica se existiram modificações nas variáveis de entrada de algum componente em relação à chamada para execução anterior, repetindo a execução daquelas rotinas onde tal se tenha verificado. Este processo iterativo repete-se em cada passo de tempo até existir convergência, ou seja, até a alteração das variáveis de entrada ser inferior a um determinado valor de tolerância (relativa e absoluta) definida pelo utilizador [4].

Através do seu editor TRNEdit, o TRNSYS permite a criação de aplicações autónomas: ficheiros executáveis que podem ser distribuídos e que permitem a realização de simulações simplificadas por utilizadores que não possuam o programa TRNSYS. Esta possibilidade e as suas capacidades de simulação transiente de sistemas de energia foram os principais fatores que levaram à seleção desta ferramenta computacional como plataforma para o desenvolvimento do modelo de simulação do secador solar.

2.2. Modelo de simulação

O modelo de simulação desenvolvido implementa o diagrama de princípio da Figura 2: circuito primário composto pelo campo solar (conjunto de coletores solares e circuito de distribuição de fluido de trabalho), tubo coletor de ida e retorno do fluido de trabalho, bomba de circulação e sistema de armazenamento térmico de energia; circuito secundário composto por uma caldeira auxiliar, bomba de circulação e secador de lamas. O resultado gráfico desta implementação pode ser observado na Figura 3. A Tabela 1 identifica os principais componentes utilizados na implementação do modelo (excluem-se os componentes associados ao controlo do sistema e ao processamento de resultados).

Este é um modelo quase-estacionário que permite a simulação transiente (mas não dinâmica) da operação e desempenho térmico do sistema ao longo de um ano. As secções seguintes

apresentam as características principais dos elementos mais relevantes do modelo, incluindo uma lista de variáveis de entrada e parâmetros que devem ser fornecidos pelo utilizador (ver também a tabela contida na secção 3).

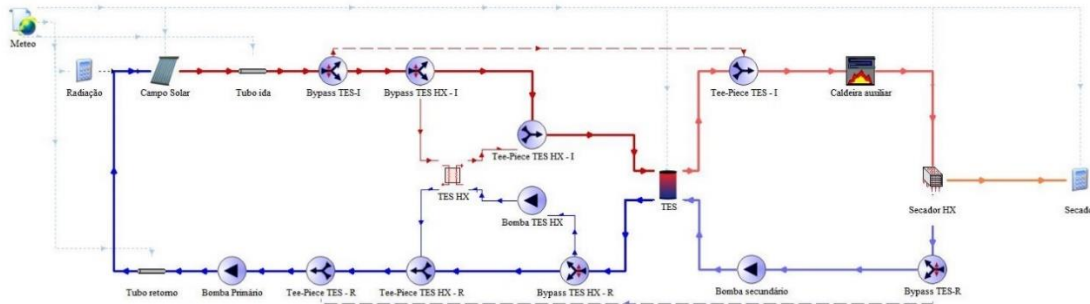


Figura 3 – Visualização gráfica do modelo desenvolvido no programa TRNSYS.

Tabela 1 – Componentes utilizados na implementação do modelo.

Nome	Componente (Type)	Descrição	Função
Meteo	15	Leitor de dados meteorológicos e processador de dados de radiação solar.	Ler e processar o ficheiro meteorológico anual (TMY2) da instalação, fornecendo valores de irradiância e ângulos solares, temperaturas atmosféricas e velocidade do vento.
Campo solar	71	Campo solar constituído por conjuntos de baterias de coletores solares ligados em série.	Modelar coletores solares - planos, de tubo de vácuo e concentradores. Calcular a temperatura de saída do fluido de trabalho.
Tubo (ida e retorno)	31	Tubo circular isolado preenchido por fluido de transferência de calor.	Modelar o comportamento térmico de um fluido circulando no tubo. Calcular a perda de energia na tubagem e a temperatura de saída do fluido de transferência de calor.
Bomba Primário	114	Bomba circuladora de velocidade constante.	Impor o caudal mássico do fluido de trabalho no circuito do campo solar.
Bypass (TES-I, TES HX-I, TES HX-R)	11f	Válvula de três vias.	Controlar o circuito de circulação do fluido de transferência de calor:
Tee-piece (TES-I, TES HX-I, TES HX-R)	11h	Válvula de três vias.	Controlar o circuito de circulação do fluido de transferência de calor.
TES HX	5	Permutador de calor contra-corrente.	Modelar o desempenho térmico de um permutador de calor (contra-corrente) externo do sistema de armazenamento térmico de energia. Calcular a temperatura de saída dos fluidos em cada extremidade do permutador.

Nome	Componente (Type)	Descrição	Função
Bomba TES HX	114	Bomba circuladora de velocidade constante.	Impor o caudal mássico do fluido do sistema de armazenamento de calor de integração indireta.
TES	158	Tanque de armazenamento de energia.	Modelar o comportamento térmico de um tanque com estratificação. Calcular a temperatura em cada estrato e nas saídas do tanque.
Caldeira auxiliar	122	Caldeira de combustão	Modelar o comportamento térmico de uma caldeira de combustão. Calcular a temperatura do fluido de transferência de calor à saída da caldeira.
Secador HX	140	Permutador de calor líquido-ar do secador	Modelar o desempenho térmico de um permutador de calor líquido-ar em regime contra-corrente. Calcular a temperatura de saída dos fluidos em cada extremidade do permutador e a humidade relativa do ar quente.
Secador	Equações	Processo de secagem das lamas de ETAR	Calcular a massa de lamas processada por um secador convectivo em função da energia fornecida pelo sistema.

2.2.1. Meteorologia

Uma das informações requeridas pelo modelo são os dados meteorológicos horários para o local da instalação que se pretende simular. Desta forma, o modelo utiliza o componente *Type 15* para processar a informação meteorológica fornecida pelo utilizador através de um ficheiro de dados com o formato TMY2. Este ficheiro é lido pelo programa e os dados de radiação são processados de modo a calcular as três componentes da irradiância solar (direta, difusa e global) no plano do coletor de acordo com a metodologia apresentada em [5]. Para este processamento o modelo assume um albedo do solo fixo igual a 0,2 (ou 0,7 caso o solo esteja coberto por neve).

Este componente efetua também a interpolação das variáveis meteorológicas (temperatura, humidade relativa, irradiância solar, etc.) para passos de tempo sub-horários. Adicionalmente, são calculados outros parâmetros relevantes para a operação do modelo como os ângulos de azimute e zénite solar.

Para executar uma simulação o utilizador necessita de fornecer as seguintes informações:

- Tipo/configuração do coletor utilizado: 0 – Com seguimento a um eixo; 1 – Coletor sem seguimento; 3 – Refletor Fresnel linear;
- Inclinação da superfície do coletor [°];
- Azimute da superfície do coletor [°];
- Ficheiro em formato TMY2 com informação meteorológica horária para um ano completo.

2.2.2. Campo solar

O componente *Type 71* é utilizado para modelar um campo solar composto por baterias de coletores solares (i.e., conjuntos de coletores ligados em série) ligadas em paralelo aos tubos coletores do circuito hidráulico. A orientação do campo solar e a inclinação dos coletores (no caso dos sistemas com seguimento a um eixo é a inclinação do eixo de seguimento) é definida pelo utilizador.

O desempenho térmico do campo solar é modelado a partir da equação [6]:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{saída} - T_{entrada}) = A G \left(\eta_0 K_\theta(\theta_L, \theta_T) - a_1 \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G} \right)$$

onde \dot{Q} representa a potência térmica fornecida pelo coletor ao fluido de trabalho, \dot{m} o caudal mássico de fluido no coletor, C_p o seu calor específico, $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ a temperatura do fluido à entrada e saída do coletor, respectivamente, G a irradiância solar incidente na área de abertura do coletor, η_0 a eficiência do coletor na ausência de perdas térmicas para um ângulo de incidência solar normal ao plano da área de abertura do coletor, $K_\theta(\theta)$ o modificador de ângulo de incidência (biaxial), a_1 e a_2 os coeficientes de perda térmica do coletor, T_m a temperatura média do coletor (ou seja, a média entre a temperatura de entrada e saída do coletor) e T_{amb} a temperatura ambiente. Note-se que esta é uma equação de estado estacionário, não incorporando nenhum termo que permita considerar os efeitos da capacitância térmica do coletor.

Para executar uma simulação o utilizador necessita de fornecer as seguintes informações:

- Número de coletores em série por bateria;
- Área de abertura total do campo solar [m²];
- Calor específico do fluido de transferência de calor do circuito primário [kJ/(kg K)];
- Caudal mássico específico (i.e., por unidade de área de superfície) utilizado no ensaio de desempenho do coletor [kg/(h m²)];
- Eficiência do coletor na ausência de perdas térmicas para um ângulo de incidência solar normal [-];
- Coeficientes de perda térmica do coletor [-];
- Número de ângulos longitudinais utilizados na discretização do modificador de ângulo de incidência;
- Número de ângulos transversais utilizados na discretização do modificador de ângulo de incidência;
- Ficheiro com discretização do modificador de ângulo de incidência.

2.2.3. Sistema de armazenamento de energia térmica

O modelo desenvolvido considera três possibilidades para o sistema de armazenamento de energia térmica: inexistência; integração direta; integração indireta com permutador de calor externo.

No primeiro caso o tanque de armazenamento não é considerado pelo modelo e o fluido de transferência de calor circula diretamente entre a tubagem proveniente do campo solar e a caldeira auxiliar. Nos restantes casos considera-se a existência de um tanque cilíndrico vertical.

O tanque é modelado pelo componente *Type 158* [6] através de um modelo unidimensional constituído por um conjunto de nós isotérmicos decorrentes da divisão do tanque em segmentos horizontais de igual volume. O modelo considera trocas de energia entre nós adjacentes devido à condução térmica entre o fluido e à troca de massa decorrente do movimento do fluido entre nós (incluindo mistura por perda de estratificação). Adicionalmente as perdas de calor para o ambiente também são consideradas para as paredes laterais, do topo e fundo do tanque.

Desta forma, pode-se calcular a variação da temperatura ao longo do tempo num determinado nó i como

$$\frac{dT_i}{dt} = (\dot{Q}_{topo,i} + \dot{Q}_{base,i} + \dot{Q}_{parede,i} + \dot{Q}_{caudal,i} + \dot{Q}_{mistura,i})$$

Onde $\dot{Q}_{topo,i}$, $\dot{Q}_{base,i}$ e $\dot{Q}_{parede,i}$ representam as trocas de calor do nó i com o topo, base e parede do nó, respetivamente. Note-se que no caso do nó superior (topo do tanque) $\dot{Q}_{topo,i}$ representa a energia trocada com o ambiente através do topo do tanque e no caso do nó inferior (base do tanque) $\dot{Q}_{base,i}$ representa a energia trocada com o ambiente através da base do tanque. Por sua vez $\dot{Q}_{caudal,i}$ representa a energia trocada com os nós e/ou tubagens adjacentes devido ao fluxo mássico causado pela entrada e saída de fluido no tanque. Finalmente, $\dot{Q}_{mistura,i}$ representa a energia trocada com um nó adjacente devido à perda de estratificação - quando ocorre uma inversão de temperatura entre dois tanques (i.e., um nó apresenta uma temperatura superior ao nó imediatamente acima) o modelo mistura totalmente ambos os nós de forma a evitar problemas de instabilidade numérica.

No primeiro caso o utilizador não tem de definir nenhum parâmetro relativo a este sistema. Nos restantes casos o utilizador deverá definir:

- O volume específico do depósito do sistema de armazenamento de energia térmica, i.e., o volume do depósito por unidade de área de abertura do campo solar [l/m^2];
- O calor específico do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica [$kJ/(kg K)$];
- A densidade do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica [kg/m^3];
- A condutividade térmica do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica [$kJ/(h m K)$].

Caso o utilizador tenha definido um circuito dotado de armazenamento de energia térmica de integração indireta com permutador de calor externo, o modelo considera a existência de um permutador contra-corrente entre o circuito primário e o sistema de armazenamento. Esse permutador é modelado pelo componente *Type 5* através do método ϵ -NTU [6]. O utilizador deverá fornecer o valor do coeficiente global de transferência de calor do permutador (UA) ou em alternativa indicar o ponto de funcionamento nominal do permutador de calor (temperaturas de entrada e saída e caudais). No último caso, o programa calcula o valor do coeficiente global de transferência de calor do permutador a partir dos dados nominais fornecidos pelo utilizador.

No caso de um circuito com permutador de calor externo, para além dos elementos acima identificados, o utilizador deverá fornecer:

- Indicação do modo de cálculo do coeficiente global de transferência de calor do permutador de calor (UA): 0 – UA calculado a partir das condições de funcionamento nominal do permutador; 1 – UA fornecido pelo utilizador.

- Indicação do valor do coeficiente global de transferência de calor do permutador de calor, caso a opção anterior seja 1 [kJ/(h K)];

- Indicação das condições de funcionamento nominal do permutador de calor, caso a opção seja 0:

- a) Temperatura de entrada do lado quente do permutador no ponto de desenho, ou nominal [°C];

- b) Temperatura de saída do lado quente do permutador no ponto de desenho, ou nominal [°C];

- c) Temperatura de entrada do lado frio do permutador no ponto de desenho, ou nominal [°C];

- d) Caudal mássico no lado frio (tanque) do permutador no ponto de desenho, ou nominal [kg/h];

- Temperatura máxima admissível no tanque [°C].

2.2.4. Sistema de apoio

O sistema de apoio consiste numa caldeira, sendo esta modelada de acordo com o componente *Type 122* [6]. Este modelo calcula a energia necessária para atingir a temperatura objetivo ($T_{objetivo}$, definida pelo utilizador) à saída da caldeira e verifica se esta é superior à potência máxima que a caldeira pode disponibilizar, \dot{Q}_{max} . Desta forma, a energia transferida para o fluido de trabalho é dada por:

$$\dot{Q} = \begin{cases} \dot{m} C_p (T_{objetivo} - T_{entrada}) & \text{se } \dot{m} C_p (T_{objetivo} - T_{entrada}) < \dot{Q}_{max} \\ \dot{Q}_{max} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde \dot{m} é o caudal mássico do fluido que circula na caldeira (caudal do fluido no circuito secundário), C_p o calor específico a pressão constante e $T_{entrada}$ a temperatura do fluido à entrada da caldeira. A temperatura do fluido à saída da caldeira é dada por

$$T_{saída} = T_{entrada} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_p}$$

Note-se que este modelo assume que a caldeira tem um controlo perfeito, capaz de garantir a obtenção da temperatura exata pretendida pelo utilizador. Adicionalmente, caso o caudal do fluido que circula na caldeira seja zero esta mantém-se inoperacional. Finalmente, a energia consumida sob a forma de combustível é calculada a partir da energia transferida para o fluido de trabalho e do rendimento global da caldeira.

Para executar uma simulação o utilizador necessita de fornecer as seguintes informações relativas ao sistema de apoio:

- Potência térmica máxima da caldeira auxiliar [W];
- Calor específico a pressão constante do fluido de transferência de calor do circuito secundário [kJ/(kg K)];
- Temperatura predefinida para a saída da caldeira [°C];
- Rendimento global da caldeira [-].

2.2.5. Secador de lamas

O modelo do secador de lamas separa-se em dois componentes: *Type 140* que modela um permutador de calor líquido-ar; balanço de energia simplificado do processo de secagem que permite estimar o caudal mássico de lamas que podem ser secas com a energia disponibilizada pelo sistema.

O modelo do permutador de calor líquido-ar calcula o coeficiente global de transferência de calor (UA) do permutador a partir de dados de operação nominal através do método ϵ -NTU. Para cada passo de simulação e considerando o valor de UA calculado anteriormente (e que se assume constante ao longo de toda a simulação) aplica o referido método para determinar a energia trocada no permutador e as temperaturas à saída do mesmo.

O caudal mássico de lamas húmidas secas em cada momento é obtido através de um balanço de energia simplificado do processo de secagem [7]. A energia requerida para secar um quilograma de lama húmida é dado por

$$q_{secagem} = \lambda_{H_2O}(x_h - x_s) + C_{p,lama}(T_{lama} - T_{amb})$$

onde λ_{H_2O} representa o calor latente de evaporação da água, x_h e x_s a fração de água nas lamas húmidas e secas (em base húmida), $C_{p,lama}$ o calor específico das lamas húmidas, T_{lama} a temperatura máxima das lamas no secador e T_{amb} a temperatura ambiente.

Por sua vez, o caudal mássico de lamas húmidas processadas (i.e., secas) é dado por

$$m_{sec} = \frac{\dot{m}_{ar} C_{p,ar} (T_{ar,e} - T_{ar,s})}{q_{secagem}}$$

onde \dot{m}_{ar} é o caudal de ar que circula no secador, $C_{p,ar}$ o respetivo calor específico, $T_{ar,e}$ e $T_{ar,s}$ a temperatura do ar à entrada e saída do secador. Para a definição da temperatura mínima do ar à saída do secador considera-se que esta tem de ser superior ao ponto de orvalho para limitar a dimensão do secador e evitar condensação. Esta diferença é um parâmetro definido pelo utilizador uma vez que será definida como um valor característico de cada secador.

Note-se que este modelo do secador é um modelo bastante simplificado, servindo apenas para fins de obtenção de uma estimativa inicial do desempenho do sistema. Apesar da sua simplicidade não é um modelo ideal, considerando ineficiências como a existência de um limite mínimo na temperatura de saída do ar, superior ao ponto de orvalho, ou a existência de energia desperdiçada no fornecimento de energia sensível para aquecimento das lamas a secar. Futuramente deverá ser desenvolvido e implementado um modelo mais detalhado, quasi-dinâmico da operação deste componente.

Para executar uma simulação o utilizador necessita de fornecer as seguintes informações relativas ao secador:

- Parâmetros de operação nominal do permutador de calor do secador:

- a) Temperatura de entrada do fluido de transferência de calor [°C];
- b) Caudal mássico do fluido de transferência de calor [kg/h];
- c) Temperatura de entrada do ar [°C];
- d) Humidade absoluta do ar à entrada [kg/kg];
- e) Caudal mássico do ar [kg/h];

- Potência térmica [kJ/h];

- Configuração do permutador de calor: 1 - contracorrente; 2 - paralelo; 3 - cruzado sem mistura; 4 - cruzado com mistura;

- Calor específico da lama a secar [kJ/(kg K)];

- Fração de água nas lamas húmidas (em base húmida);

- Fração de água final nas lamas após processamento (em base húmida);

- Calor latente de evaporação da água [kJ/kg];

- Calor específico do ar [kJ/(kg K)];

- Diferença de temperatura mínima entre a exaustão de ar e o ponto de orvalho [°C];

- Diferença de temperatura mínima entre o ar quente e a lama seca [°C].

2.2.6. Circuito hidráulico

O modelo pode ser dividido em dois circuitos hidráulicos: o circuito primário e o circuito secundário. O circuito primário corresponde aos elementos associados à operação do campo solar, nomeadamente, tubagens coletoras, bomba circuladora, coletores solares e sistema de armazenamento de energia térmica. O circuito secundário corresponde aos elementos associados ao fornecimento de calor ao processo de secagem englobando o sistema de armazenamento de energia térmica, tubagens, bomba circuladora, caldeira de apoio, permutador de calor do secador. O sistema de armazenamento de energia térmica atua como fronteira entre estes dois circuitos – para os fins deste trabalho será considerado como sendo parte do circuito primário. Tipicamente nos sistemas solares térmicos sem armazenamento de energia existe apenas um circuito, circulando o fluido de transferência de calor diretamente entre o campo solar e a interface com o processo consumidor de calor.

Esta secção lida com os elementos de ambos os circuitos hidráulicos que não foram tratados em secções autónomas: tubagens, bombas de circulação e válvulas de três vias.

Tubagens

As tubagens do circuito primário são modeladas pelo componente *Type 31* segundo um modelo do tipo *plug-flow* [6]. O tubo é dividido num conjunto de segmentos de dimensão variável entre os quais não existe mistura de massa ou trocas de energia por condução. A massa de fluido que entra no tubo é definida como um novo segmento que desloca os segmentos já existentes. Assim, a massa de fluido que sai do tubo é, em cada passo de tempo, igual à massa que nele entra. Por sua vez, a temperatura do novo segmento é igual à temperatura do fluido à entrada da tubagem e a temperatura do fluido à saída do tubo é igual a uma temperatura média, ponderada pela massa, dos segmentos que saíram do tubo. A perda de energia térmica do fluido que percorre o tubo para o ambiente é considerada no modelo, sendo calculada para cada segmento através de um coeficiente de transferência de calor definido pelo utilizador. A variação da temperatura de cada segmento é calculada de acordo com a energia perdida pelo fluido para o ambiente.

Como se pode observar na Figura 3, o modelo apenas considera os efeitos das tubagens coletoras que ligam o campo solar ao sistema de armazenamento de energia, desprezando a perda de energia ocorrida nas tubagens que ligam aquele sistema ao secador. Esta opção decorre do facto de tipicamente o sistema de armazenamento de energia térmica ficar nas proximidades do processo térmico a alimentar.

Para executar uma simulação o utilizador necessita de fornecer as seguintes informações relativas à tubagem do seu sistema:

- Comprimento do tubo coletor de ida (do sistema de armazenamento até ao campo solar) [m];
- Comprimento do tubo coletor de retorno (do sistema de armazenamento até ao campo solar) [m];
- Densidade do fluido de transferência de calor [kg/m³].

O diâmetro interno da tubagem é calculado automaticamente pelo modelo considerando o caudal nominal do sistema solar e assumindo um escoamento com velocidade igual a 1 m/s.

Bomba de circulação

O modelo considera a existência de até três bombas de circulação modeladas de forma igual: bomba do circuito primário; bomba do circuito secundário; bomba do sistema de armazenamento de energia térmica com permutador externo.

O modelo das bombas de circulação considera o valor do caudal nominal imposto pelo utilizador e um parâmetro de controlo de operação (*on/off*) imposto internamente pelo algoritmo de controlo de cada um dos circuitos. O caudal mássico à saída da bomba é igual ao caudal mássico nominal quando o parâmetro de controlo é igual a 1 (on) ou nulo caso contrário. Desta forma, este modelo ignora fenómenos associados ao arranque ou paragem da bomba.

A temperatura do fluido à saída da bomba circuladora é igual à temperatura de entrada acrescida por um ganho de temperatura decorrente do calor transferido da bomba para o fluido devido a ineficiências da sua operação:

$$T_{saída} = T_{entrada} + \frac{P_n \eta_{motor} \left(1 - \frac{\eta_{global}}{\eta_{motor}}\right) + P_n (1 - \eta_{motor}) f}{\dot{m} C_p}$$

Onde $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ representam a temperatura do fluido à entrada e saída da bomba, P_n a potência eléctrica nominal do motor, η_{motor} o rendimento do motor da bomba, η_{global} a eficiência global da bomba (motor e bombagem), f a fracção de calor produzido pelo motor eléctrico que é transmitido ao fluido, \dot{m} o caudal mássico imposto pela bomba e C_p o calor específico do fluido de transferência de calor.

O caudal nominal da bomba de circulação do circuito primário e da bomba do sistema de armazenamento é calculado a partir do caudal específico do campo solar fornecido pelo utilizador. Por sua vez, o caudal nominal da bomba de circulação do circuito secundário é definido directamente pelo utilizador. Os parâmetros associados à eficiência das bombas não são de momento ajustáveis pelo utilizador. Desta forma, o utilizador terá de fornecer os seguintes parâmetros associados ao funcionamento das bombas de circulação:

- Caudal volumétrico específico nominal do campo solar [$l/(h \text{ m}^2)$];
- Caudal mássico nominal do circuito secundário [kg/h].

Válvulas de três vias

O modelo da válvula de três vias desviadora considera uma variável de comando que define a fracção de caudal mássico que é direccionado por cada uma das duas saídas da válvula. A temperatura de saída do fluido é igual à temperatura de entrada (válvula isentálpica). No caso do presente modelo a variável de comando é definida pelo utilizador de acordo com o esquema hidráulico que pretende simular.

No modelo da válvula de três vias misturadora o caudal mássico do fluido à saída do elemento é igual à soma do caudal existente em cada entrada. A temperatura do caudal de saída é

determinada pela média ponderada pelo caudal mássico das temperaturas do fluido em cada entrada.

No caso destes elementos o utilizador apenas necessita de definir a configuração hidráulica do circuito que pretende modela, fornecendo a seguinte informação:

- Variável de controlo do *bypass* ao sistema de armazenamento de energia térmica: 0 – não ocorre *bypass* do sistema de armazenamento; 1 – ocorre *bypass* do sistema de armazenamento;
- Variável de controlo do permutador de calor do sistema de armazenamento de energia térmica: 0 – o sistema de armazenamento do tipo indireto com permutador de calor externo; 1 - o sistema de armazenamento do tipo direto.

2.2.7. Sistema de controlo

O controlo do sistema de secagem ocorre em duas zonas distintas: circuito primário e circuito secundário.

O controlo do circuito primário faz-se por comando da bomba de circulação deste circuito. Esta bomba recebe comando de funcionamento quando ocorre simultaneamente a existência de: irradiância solar acima de um valor mínimo (10 W/m^2); diferencial de temperatura entre a saída do campo solar e o nível do tanque de armazenamento onde ocorre a saída de fluido para o retorno do campo solar. Adicionalmente, o modelo verifica a existência de um sobreaquecimento do circuito primário (temperatura superior a um valor máximo definido pelo utilizador), situação em que a circulação no campo solar é suspensa.

Por sua vez, caso o utilizador defina a existência de um sistema de armazenamento de energia térmica do tipo indireto com permutador de calor externo, a bomba de circulação desse sistema é atuada pelo mesmo controlador da bomba de circulação do circuito primário.

O controlo do circuito secundário processa-se através da bomba de circulação deste circuito cuja atuação depende de uma calendarização definida pelo utilizador. Dentro dos períodos de funcionamento todo o sistema de secagem opera normalmente, sendo o caudal imposto pela bomba de circulação e igual ao seu valor nominal.

2.2.8. Resultados

O modelo permite a realização de simulações do desempenho anual do sistema de secagem de lamas de depuração com energia solar térmica. Na atual versão, os resultados são transmitidos ao utilizador sob a forma de um ficheiro de texto (Figura 4) com dados mensais relativos a:

- a) Irradiação solar;
- b) Energia fornecida pelo campo solar ao sistema de armazenamento;
- c) Energia fornecida pelo sistema solar ao secador;
- d) Energia fornecida pelo sistema auxiliar ao secador;
- e) Energia total fornecida ao secador;
- f) Massa de lama seca.

```
monthly.txt - Notepad
File Edit Format View Help
"INCIDENTBEAM" "ENERGYGAINCOLL" "DUMPEDENERGY" "ENER"
TIME HOURS NAV NAV NAV NAV NAV
+7.440000000000000E+02 +2.7341885074232996E+05 +1.7564625730097300E+08 +4.0983517247767225E+06 +1.
+1.416000000000000E+03 +2.7037755806539097E+05 +1.8583788409543875E+08 +1.6532678544603972E+07 +1.
+2.160000000000000E+03 +4.2132435302130453E+05 +2.8448938415497851E+08 +5.1229591932080761E+07 +2.
+2.880000000000000E+03 +5.7959347061704926E+05 +3.4959049957528299E+08 +1.1310796739446010E+08 +3.
+3.624000000000000E+03 +7.0915297177156084E+05 +4.7252344984091741E+08 +1.0040304331026946E+08 +4.
+4.344000000000000E+03 +8.0082814522536052E+05 +5.1764995129005569E+08 +1.3916966257830191E+08 +4.
+5.088000000000000E+03 +9.7621191495842102E+05 +6.2944978809896946E+08 +1.9154108268313113E+08 +6.
+5.832000000000000E+03 +8.8247396264928253E+05 +2.4875719824857789E+08 +2.4875719824857789E+08 +2.
+6.552000000000000E+03 +5.9110509722469875E+05 +3.6979716706121647E+08 +1.0605021912294094E+08 +3.
+7.296000000000000E+03 +3.6425279348860687E+05 +2.3812130023161867E+08 +4.5270128063888043E+07 +2.
+8.016000000000000E+03 +2.8612805825948314E+05 +1.9634369398737261E+08 +2.3933304349598646E+07 +1.
+8.760000000000000E+03 +2.1496376742458457E+05 +1.2387803914542365E+08 +1.4457706299284016E+05 +1.
Ln 15, Col 1
```

Figura 4 – Imagem ilustrativa do espeto gráfico do ficheiro de texto contendo dados mensais resultantes de uma simulação anual.

3. Parâmetros a definir pelo utilizador

A tabela seguinte resume os parâmetros que deverão ser definidos pelo utilizador para execução da simulação.

Tabela 2 – Parâmetros a definir pelo utilizador.

Parâmetro	Unidade	Nome
Ficheiro TMY (meteorologia)	-	Meteo
Tipo/configuração do coletor utilizado	-	col
Inclinação da superfície do coletor	º	beta
Azimute da superfície do coletor	º	az
Número de coletores em série por bateria	-	N_cs
Área de abertura total do campo solar	m ²	A_col
Calor específico do fluido de transferência de calor do circuito primário	kJ/(kg K)	Cp_p
Caudal mássico específico do ensaio de desempenho do coletor	kg/(h m ²)	m_dot_test
Eficiência do coletor na ausência de perdas térmicas para um ângulo de incidência solar normal	-	eta_0
Coefficiente de perda térmica do coletor (linear)	-	a1
Coefficiente de perda térmica do coletor (quadrático)	-	a2
Número de ângulos longitudinais utilizados na discretização do modificador de ângulo de incidência	-	N_la
Número de ângulos longitudinais utilizados na discretização do modificador de ângulo de incidência	-	N_ta
Ficheiro com discretização do modificador de ângulo de incidência	-	IAM
Comprimento do tubo coletor de ida (do sistema de armazenamento até ao campo solar)	m	L_tubo_p_ida
Densidade do fluido de transferência de calor	kg/m ³	rho_p
Comprimento do tubo coletor de retorno (do sistema de armazenamento até ao campo solar)	m	L_tubo_p_ret
Controlo do <i>bypass</i> ao sistema de armazenamento de energia térmica	-	byTES
Controlo do permutador de calor do sistema de armazenamento de energia térmica	-	byTES_HX
Caudal volumétrico específico nominal do campo solar	l/(h m ²)	Q_col
Calor específico a pressão constante do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica	kJ/(kg K)	Cp_TES
Modo de cálculo do coeficiente global de transferência de calor do permutador de calor	-	set_UA
Valor do coeficiente global de transferência de calor do permutador de calor	kJ/(h K)	UA_USER
Temperatura de entrada do lado quente do permutador de calor no ponto nominal	ºC	Thi
Temperatura de saída do lado quente do permutador de calor no ponto nominal	ºC	Tho
Temperatura de entrada do lado frio do permutador de calor no ponto nominal	ºC	Tci

Parâmetro	Unidade	Nome
Caudal mássico no lado frio (tanque) do permutador de calor no ponto nominal	kg/h	m_dot_TES_HX
Volume específico do depósito do sistema de armazenamento de energia térmica	l/m ²	v_TES
Densidade do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica	kg/m ³	rho_TES
Condutividade térmica do fluido do sistema de armazenamento de energia térmica	kJ/(h m K)	k_TES
Temperatura máxima do circuito primário	°C	Tcutout_prim
Temperatura máxima do tanque de armazenamento	°C	Tcutout_TES
Potência térmica máxima da caldeira auxiliar	W	Boiler_Qdotmax_kW
Potência térmica máxima da caldeira auxiliar	kJ/h	Boiler_Qdotmax
Capacidade térmica do fluido do circuito secundário	kJ/(kg K)	Cp_s
Temperatura predefinida para a saída da caldeira	°C	Boiler_setpoint
Eficiência global da caldeira	-	eta_boiler
Caudal mássico nominal do circuito secundário	kg/h	m_dot_s
Temperatura de entrada do fluido de transferência de calor no secador - nominal	°C	T_htf_in_sec_design
Caudal mássico do fluido de transferência de calor no secador - nominal	kg/h	m_htf_in_sec_design
Temperatura de entrada do ar no secador - nominal	°C	T_air_in_sec_design
Humidade absoluta do ar à entrada do secador - nominal	kg/kg	w_air_sec_design
Caudal mássico do ar no secador - nominal	kg/h	m_air_in_sec_design
Potência térmica do secador	kJ/h	Q_HX_sec
Configuração do permutador de calor do secador	-	HX_sec
Calor específico da lama a secar	kJ/(kg K)	cp_lama
Fração de água nas lamas húmidas (base húmida)	-	x_h
Fração de água nas lamas após processamento (base húmida)	-	x_s
Calor latente de evaporação da água	kJ/kg	lambda_H2O
Calor específico a pressão constante do ar	kJ/(kg K)	cp_air
Diferença de temperatura mínima entre o ar à saída do secador e o ponto de orvalho	°C	DT_air_cold
Diferença de temperatura mínima entre o ar quente e a lama seca [°C]	°C	DT_air_hot

4. Conclusões

No âmbito da Atividade 4 do projeto SECASOL foi desenvolvido um modelo TRNSYS para a simulação de um secador solar para lamas de ETAR. Pretende-se que esta ferramenta possa ser utilizada no apoio à realização de estudos de potencial e pré-viabilidade. Deste modo, o modelo permite ao utilizador a definição dos parâmetros mais relevantes do sistema e efetua o cálculo da massa de lamas seca ao longo de um ano para uma de três configurações base possíveis: sistema de secagem sem armazenamento de energia térmica; sistema de secagem com armazenamento de energia térmica de integração direta; sistema de secagem com armazenamento de energia térmica de integração indireta com permutador de calor externo.

Este modelo é um primeiro passo no desenvolvimento de ferramentas que possam apoiar a introdução de tecnologias renováveis baseadas em energia solar térmica nos processos de depuração de águas residuais, particularmente na secagem de lamas de depuração. Como tal, é um modelo simplificado que poderá e deverá ser aprofundado no futuro, particularmente no que respeita ao modelo do secador e do controlo do sistema. Adicionalmente, poderá ser de interesse a implementação de outras configurações mais elaboradas, dotando a ferramenta de maior flexibilidade.

O presente documento descreveu de forma abreviada os principais elementos e características do modelo, apresentando os parâmetros e variáveis de entrada que o utilizador terá de fornecer e identificando o tipo de resultados que podem ser obtidos na sua versão atual.

Referências

- [1] Mantilla, V. et al (2018). Produto do Projecto n.º 1 (PP1) - Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração aos processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos, Relatório Técnico, Projeto SECASOL, http://www.diphuelva.es/export/sites/dph/secasolpt/.galleries/documentos/Entregables/PP1_SECASOL_POR.pdf
- [2] Mantilla, V. et al (2019). Produto do Projecto n.º 2 (PP1) – Soluções técnicas de secagem utilizando energia solar térmica de concentração na depuração de águas residuais e no tratamento de resíduos sólidos urbano, Relatório Técnico, Projeto SECASOL, http://www.diphuelva.es/export/sites/dph/secasolpt/.galleries/documentos/Entregables/PP2_SECASOL_POR.pdf
- [3] Márquez, G. L. et al (2020). Producto del Proyecto n.º 10 (PP10) - Evaluación de Prototipos, Relatório Técnico, Projeto SECASOL, http://www.diphuelva.es/export/sites/dph/secasol/.galleries/documentos/Entregables/SECASOL_PP10_VERSION-FINAL.pdf
- [4] Klein, S.A. et al (2017). TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [5] Perez, R., Stewart, R., Seals, R., and Guertin, T. (1988). The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model, Sandia Report SAND88-7030
- [6] Klein, S.A. et al (2017). TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program – Volume 4: Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA
- [7] Kemp, I. (2012) Fundamentals of Energy Analysis of Dryers. Em Tsotsas, E., Mujumdar, A. S. (Eds.) Modern Drying Technology, Volume 4. Wiley-VCH