

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



# Modelado en parámetros distribuidos para secador de biomasa de banda continua

---

## Proyecto de título 410164

|                        |   |
|------------------------|---|
| Integrantes:           | Alejandro Ramirez Novoa.<br>Juan Tapia Rozas. |
| Profesor guía:         | Angel Rubio Rodríguez.                        |
| Profesor guía adjunto: | Jaime Rohten Carrasco                         |
| Fecha:                 | 04/04/2022                                    |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **RESUMEN**

La biomasa forestal se utiliza en gran cantidad para la fabricación de pellet. Sin embargo, para la fabricación de este producto se debe tener especial atención en la cantidad de agua presente en la biomasa. Es por ello en la presente investigación se modela un secador de biomasa de banda continua en forma dinámica utilizando la técnica parámetros distribuidos.

Se hace uso del software para realizar las simulaciones de las ecuaciones que representan el proceso. Los resultados muestran un gran retardo en la dinámica del proceso, lo cual sin duda se debe tener en cuenta a la hora de decidir sobre la estrategia de control a utilizar.

La biomasa forestal se utiliza en gran cantidad para la fabricación de pellet. Sin embargo, para la fabricación de este producto se debe tener especial atención en la cantidad de agua presente en la biomasa. Dado esto se hace necesario un proceso previo de secado para asegurar un porcentaje de humedad que no limite la energía que se obtendrá al hacer la combustión del pellet. Es por esto por lo que en la presente investigación se modela un secador de biomasa de banda continua en forma dinámica utilizando la técnica parámetros distribuidos.

Se hace uso del software para realizar las simulaciones de las ecuaciones que representan la dinámica del proceso. Los resultados muestran un gran retardo en la variable de salida de interés (ante variaciones de las posibles entradas de control), lo cual sin duda se debe tener en cuenta a la hora de decidir sobre la estrategia de control a utilizar.

## **PALABRAS CLAVES**

Secador – Biomasa – Modelado – ECOSIMPRO – Humedad

*Alejandro Ramirez, Juan Tapia*



## Índice de Contenidos

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducción .....  | 9  |
| 2     | Marco de la investigación .....                             | 10 |
| 2.1   | Contexto .....  | 10 |
| 2.2   | Biomasa.....  | 10 |
| 2.2.1 | Características energéticas de la biomasa .....             | 12 |
| 2.2.2 | Industria del aserrado .....                                | 15 |
| 2.3   | Tipos de secadores .....                                    | 15 |
| 2.3.1 | Secadores rotatorios .....                                  | 17 |
| 2.3.2 | Secador de cinta .....                                      | 18 |
| 2.4   | Principios del secado.....                                  | 19 |
| 2.4.1 | Comportamiento característico de la humedad .....           | 22 |
| 3     | Modelado y simulaciones.....                                | 24 |
| 3.1   | Modelos dinámicos de procesos de secado .....               | 24 |
| 3.2   | Modelación dinámica del proceso.....                        | 28 |
| 3.2.1 | Consideraciones para el modelo:.....                        | 28 |
| 3.2.2 | Ecuaciones de balance de masas y energía: .....             | 29 |
| 3.2.3 | Ecuaciones de relaciones.....                               | 34 |
| 3.3   | Uso de ECOSIMPRO.....                                       | 38 |
| 3.4   | Análisis de los resultados .....                            | 44 |
| 3.4.1 | Efectos de la variación de los parámetros de entrada.....   | 52 |
| 3.4.2 | Análisis dinámico de la planta.....                         | 59 |
| 4     | Posibles estrategias de control a utilizar.....             | 70 |
| 4.1   | Técnicas de control utilizadas .....                        | 70 |
| 5     | Conclusión.....   | 73 |
| 6     | Anexos.....   | 75 |
| 6.1   | Anexo N°1 “Cálculos de algunos parámetros del modelo” ..... | 75 |
| 6.2   | Anexo N°2 “Carta Psicométrica” .....                        | 80 |
| 6.3   | Anexo N°3 Reescritura de balances energéticos.....          | 81 |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.3.1 | Balance de energía para biomasa húmeda.....                 | 81 |
| 6.3.2 | Balance de energía del gas húmedo .....                     | 82 |
| 6.4   | Anexo N°4 “Código principal Ecosimpro” .....                | 83 |
| 6.5   | Anexo N°5 “Código Experimento Ecosimpro”.....               | 89 |
| 6.6   | Anexo N°6 “Código modelos PORT y simulación (MATLAB)” ..... | 91 |
| 7     | Bibliografía .....  | 94 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIG. 2-1 “ASERRÍN (FUENTE: MADERA21.CL)” .....  | 11 |
| FIG.2-2 “CHIP (FUENTE: MADERA21.CL)” .....  | 12 |
| FIG. 2-3 “PODER CALORÍFICO INFERIOR EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD (BIOMASS TRADE CENTER, 2008)” .....              | 14 |
| FIG.2-4 “SECADOR ROTATORIO (FUENTE: FAO 2012)” .....  | 17 |
| FIG.2-5 “ASPAS INTERNAS (FUENTE: FAO 2012)” .....   | 17 |
| FIG.2-6 “SECADOR DE BANDA CONTINUA. (FUENTE: STELA)” .....  | 18 |
| FIG.2-7 “EVAPORACIÓN VS EBULLICIÓN” .....   | 19 |
| FIG.2-8 “PRESIÓN DE VAPOR DE SATURACIÓN” .....  | 20 |
| FIG.2-9 “VARIABLES GRANO DE BIOMASA” .....  | 21 |
| FIG.2-10 “CURVA CARACTERISTICA DE SECADO” .....   | 22 |
| FIG.2-11 “VELOCIDAD DE SECADO” .....  | 22 |
| FIG.3-1 “CURVA DE SECADO” .....   | 25 |
| FIG.3-2 “CURVAS DE SECADO EXPERIMENTAL Y CALCULDA CON EL MODELO NEWTON Y PAGE” .....                          | 27 |
| FIG.3-5 “MODELO PARAMETROS DISTRIBUIDOS” .....  | 29 |
| FIG.3-6 “PESTAÑA PRINCIPAL DEL SOFTWARE ECOSIMPRO” .....  | 41 |
| FIG.3-7 “APARTADO DE DIALOGO DE ERRORES” .....  | 42 |
| FIG.3-8 “CREACIÓN DE UNA PARTICIÓN” .....   | 42 |
| FIG.3-9 “CONFIGURACIÓN DE EXPERIMENTO” .....  | 43 |
| FIG.3-10 VENTANA DE VISUALIZACIÓN GRAFICA .....   | 44 |
| FIG. 3-11 “HUMEDAD Y TEMPERATURA DE LA BIOMASA Y GAS DE SECADO PARA N=1” .....                                | 47 |
| FIG. 3-12 “HUMEDAD Y TEMPERATURA DE LA BIOMASA Y GAS DE SECADO PARA N=5” .....                                | 47 |
| FIG. 3-13 “HUMEDAD Y TEMPERATURA DE LA BIOMASA Y EL GAS DE SECADO PARA N=10” .....                            | 48 |
| FIG 3-14 “HUMEDAD DE LA BIOMASA [KG AGUA / KG BIOMASA SECA]” .....  | 50 |
| FIG. 3-15 “FLUJOS MASICOS BIOMASA SECA Y HUMEDA [KG/s]” .....   | 50 |
| FIG. 3-16 “ÉNTALPIA DEL GAS DE SECADO Y BIOMASA” .....  | 51 |
| FIG. 3-17 “COMPORTAMIENTO DE OTRAS VARIABLES DE LA PLANTA” .....  | 52 |
| FIG. 3-18 “VARIABLES DE LA PLANTA ANTE UNA DISMINUCION DEL FLUJO MASICO DE GAS DE SECADO (WGH=1[Kg/s])” ..... | 53 |
| FIG. 3-19 “VARIABLES DE LA PLANTA ANTE DISMINUCION DEL FLUJO MASICO DE GAS DE SECADO (WGH=0.5[Kg/s])” .....   | 54 |
| FIG. 3-20 “EFECTO DE LA DISMINUCION DE TEMPERATURA DEL GAS DE SECADO A 50°C” .....                            | 55 |
| FIG. 3-21 “HUMEDAD DE LA BIOMADA ANTE VARIACIONES DEL FLUJO MASICO DE BIOMASA DE ENTRADA” .....               | 56 |
| FIG. 3-22 “HUMEDAD DE LA BIOMASA DE SALIDA ANTE DISMINUCIONES DE LA HUMEDAD DE ENTRADA” .....                 | 57 |
| FIG. 3-23 HUMEDAD DE SALIDA ANTE DISMINUCION DE $X_{e[1]}$ Y AUMENTO DE $W_{BH\_e[1]}$ .....                  | 58 |
| FIG. 3-24 “HUMEDAD DE LA BIOMASA ANTE DISMINUCION DE LA ALTURA DEL MANTO DE BIOMASA” .....                    | 59 |
| FIG. 3-25 “RESPUESTA DINAMICA ANTE VARIACIONES EN $T_{G\_e[1]}$ ” .....                                       | 60 |
| FIG. 3-26 RESPUESTA DEL MODELO PORT ANTE VARIACIONES DE $T_{G\_e[1]}$ .....                                   | 62 |
| FIG. 3-27 RESPUESTA DINAMICA ANTE VARIACIONES DE $W_{GH\_e[1]}$ .....   | 63 |
| FIG. 3-28 “RESPUESTA DEL MODELO PORT PARA VARIACIONES DE $W_{GH\_e[1]}$ ” .....                               | 64 |
| FIG. 3-29 RESPUESTA DINAMICA ANTE VARIACIONES DE $X_{e[1]}$ .....   | 65 |
| FIG. 3-30 “RESPUESTA DEL MODELO PORT PARA VARIACIONES DE $X_{e[1]}$ ” .....                                   | 66 |
| FIG. 3-31 RESPUESTA DINAMICA ANTE VARIACIONES DE $T_{B\_e[1]}$ .....  | 67 |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



|  |    |
|--|----|
| FIG. 3-32 “RESPUESTA DEL MODELO PORT PARA VARIACIONES DE $T_{B\_E}[1]$ ” ..... | 68 |
| FIG 3-33 DIAGRAMA EN BLOQUE DEL MODELO .....                                   | 69 |
| FIG. 6-1 CARTA PSICOMETRICA.....   | 80 |



## NOMENCLATURA

**Tabla 1.1 Definición de variables**

| <b>Parámetro</b>  | <b>Descripción</b>                          | <b>Unidades</b>           |
|-------------------|---|---------------------------|
| T <sub>b</sub>    | Temperatura de la biomasa de entrada        | °C                        |
| T <sub>g</sub>    | Temperatura del gas entrada al secador      | °C                        |
| V <sub>b</sub>    | Velocidad de avance de la biomasa           | m/s                       |
| W <sub>b</sub>    | Flujo masico de biomasa seca                | Kg/s                      |
| W <sub>bh</sub>   | Flujo masico de biomassa húmeda             | Kg/s                      |
| W <sub>g</sub>    | Flujo masico de gas seco (gas de secado)    | Kg/s                      |
| W <sub>gh</sub>   | Flujo masico de gas húmedo (gas de secado)  | Kg/s                      |
| W <sub>dif</sub>  | Flujo de difusión                           | Kg/s                      |
| W <sub>evap</sub> | Flujo de evaporación                        | Kg/s                      |
| X                 | Humedad de la biomasa en base seca          | Kg agua / Kg biomasa seca |
| X <sub>c</sub>    | Humedad critica de la biomasa en base seca  | Kg agua / Kg biomasa seca |
| X <sub>int</sub>  | Humedad interna de biomasa en base seca     | Kg agua / Kg biomasa seca |
| X <sub>sup</sub>  | Humedad superficial de biomasa en base seca | Kg agua / Kg biomasa seca |
| Y                 | Humedad del gas en base seca                | Kg agua / Kg biomasa seca |
| A <sub>k</sub>    | Área de transferencia de calor              | m <sup>2</sup>            |
| λ                 | Calor latente de evaporación de agua        | KJ/Kg                     |
| C <sub>pa</sub>   | Calor especifico del agua                   | KJ/(Kg°C)                 |
| C <sub>pg</sub>   | Calor especifico del gas de secado          | KJ/(Kg°C)                 |
| C <sub>pm</sub>   | Calor especifico de la madera               | KJ/(Kg°C)                 |
| C <sub>pga</sub>  | Calor especifico del aire                   | KJ/(Kg°C)                 |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



|          |   |                        |
|----------|---|------------------------|
| $\rho_b$ | Densidad de biomasa   | Kg/m <sup>3</sup>      |
| $\rho_g$ | Densidad del aire (gas de secado)                                 | Kg/m <sup>3</sup>      |
| $F_g$    | Fujo volumétrico de gas húmedo                                    | m <sup>3</sup> /s      |
| $hc_1$   | Coeficiente de transmisión de calor entre el gas y biomasa húmeda | KJ/(K*m <sup>2</sup> ) |
| $hc_2$   | Coeficiente de calor entre gas y biomasa húmeda                   | KJ/(K*m <sup>2</sup> ) |
| $H_{ag}$ | Entalpia del agua   | KJ                     |
| $H_{bh}$ | Entalpia de biomasa húmeda  | KJ                     |
| $H_{gh}$ | Entalpia del gas húmedo   | KJ                     |
| $K_d$    | Constante de difusión   | Kg agua/s              |
| $L$      | Longitud del secador  | M                      |
| $m_b$    | Masa de biomasa seca  | Kg                     |
| $m_g$    | Masa de gas seco  | Kg                     |
| $P_{at}$ | Presión atmosférica   | Pa                     |
| $p_{mg}$ | Peso molecular del gas de secado                                  | Kg/Kmol                |
| $Q$      | Calor transferido del gas hacia la superficie de la biomasa       | KJ                     |
| $R$      | Constante de los gases ideales                                    |                        |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 1 INTRODUCCIÓN

La biomasa es la energía renovable más utilizada en Chile y está presente con un 25% de la matriz primaria [1]. Esta aporta su poder calorífico en procesos industriales, generación de electricidad y calefacción donde el chip, el pellet y la leña son los más conocidos.

No exento de problemas, se debe trabajar con una variable crítica que limita el calor que se puede obtener por medio de su combustión: la humedad. Cuando se combustiona biomasa húmeda, se necesita evaporar el agua, perdiendo parte de la energía en este proceso y, por eso, cuanto más alto sea el contenido de humedad, menos calor efectivo se obtiene.

Este trabajo de título se enfoca en realizar un modelado dinámico en parámetros distribuidos para el secador modular de biomasa que está en desarrollo por la empresa BETECH. Enfocado principalmente para PYMES forestales, donde deseen controlar el porcentaje de humedad de la biomasa. Para ello es fundamental conocer como se comporta la humedad frente a las distintas variaciones de entradas y perturbaciones, por lo cual tras la obtención del modelo en parámetros distribuidos se procede a obtener el modelo dinámico.

### **Objetivo general**

- Análisis del proceso de secado de forma estática y dinámica

### **Objetivo Específicos**

- Análisis bibliográfico.
- Modelado dinámico del proceso de secado.
- Simulación y análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **2 MARCO DE LA INVESTIGACION**

### **2.1 Contexto**

La industria de la madera puede clasificarse como una apreciable fuente generadora de residuos durante el ciclo de explotación, generándose los mismos a lo largo de todo el proceso obtención del producto final [2]. Para darle un valor agregado a estos residuos deben ser sometidos a un proceso de secado, convirtiéndose así en materia prima para la fabricación de otro producto.

El proceso de secado es un proceso donde ocurre transferencia de calor y masa de forma simultánea, cuyas transferencias dependen tanto de las condiciones como es la temperatura, velocidad y humedad relativa al medio de secado, en conjunto con las condiciones físicas y químicas (densidad, permeabilidad, porosidad y propiedades de absorción y desorción). El secado es usado por múltiples razones dentro de las que se pueden destacar, preservación, reducción de volumen o peso, como proceso previo a otras transformaciones, etc. Debido a sus múltiples aplicaciones en diversas áreas se hace de gran interés, la comprensión de su cinética, necesaria a la hora de optimizar y controlar el proceso reduciendo los tiempos de secado, la calidad de los productos y el consumo de energía. Hoy en día existen diversos tipos de secadores, pero escasa bibliografía en lo relacionado al modelamiento dinámico del secado de biomasa forestal en un secador de banda continua, paso fundamental para el desarrollo del control.

### **2.2 Biomasa**

Se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. Por ende, su origen es muy variado. Este trabajo se enfoca en el control de secado de biomasa forestal.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



La biomasa forestal se define como toda materia orgánica utilizable como fuente de energía y cuyo origen proviene de los trabajos de mantenimiento y mejora de las masas forestales, además de los derivados generados por las industrias de transformación de la madera (aserrín, cortezas, chip, etc.) Fig.2-1 y Fig.2.-2. La principal biomasa que utiliza el secador de la empresa BETECH será la obtenida a través de los subproductos que se obtienen al procesar la madera en bruto, para posteriormente tratarla y que quede en condiciones para la elaboración de pellet.



**Fig. 2-1 “Aserrín (Fuente: Madera21.cl)”**



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**Fig.2-2 “Chip (Fuente: Madera21.cl)”**

### **2.2.1 Características energéticas de la biomasa**

La biomasa al presentarse de diferentes formas y orígenes, por ejemplo, residuos forestales, industriales, agroindustriales, presentan características distintas como granulometría, densidad, contenido de energía por unidad de volumen, contenido de humedad, contaminantes, entre otras. Las que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo particular [3].

#### **2.2.1.1 Composición química**

La biomasa está formada por una parte orgánica, otra inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica y la parte inorgánica participa en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido.

#### **2.2.1.2 Contenido en humedad**

La humedad es una característica que incide directamente en términos de la energía que es posible obtener por unidad de la biomasa. Cuando la biomasa reduce su



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



contenido de humedad, reducirá a la vez su peso, volumen y la actividad biológica de agentes externos, lo que implica un mejor transporte, logística y conservación. Otro beneficio de la reducción del contenido de humedad es que se garantiza la reducción de emisiones en la combustión, incrementa el poder calorífico y facilita su astillado o molienda. Es importante indicar la base de referencia sobre la que se expresa el porcentaje: base seca o en base húmeda.

#### 2.2.1.2.1 Contenido de humedad en base seca:

Se define como el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca Ec.1. Por ejemplo, un valor de humedad en base seca igual a 200% significa que la masa de agua presente en el material es 2 veces su masa seca [4].

$$\% H_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \cdot 100 \quad (1)$$

#### 2.2.1.2.2 Contenido de humedad en base húmeda:

Cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total. El valor obtenido de la ecuación Ec.2 representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total.

$$\% H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \cdot 100 \quad (2)$$

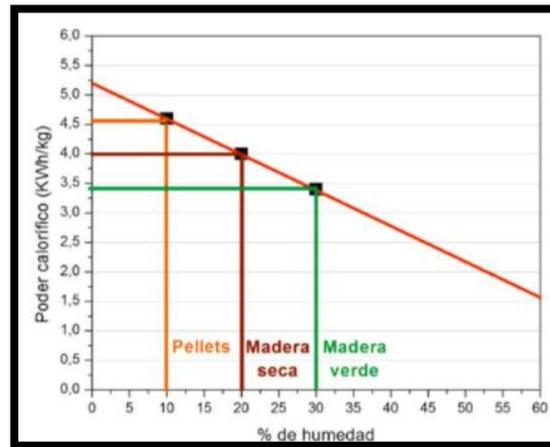
#### 2.2.1.3 Porcentaje en cenizas

Porcentaje compuesto por la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima.



#### 2.2.1.4 Poder calorífico

Es la energía que se libera por unidad de masa o por unidad de volumen de combustible en forma de calor cuando se quema la biomasa. Tenemos dos tipos de poder calorífico (superior PCS e inferior PCI, Fig2-3) en función de si se considera el agua (condensada) o no (evaporación) en el producto resultante [5].



**Fig. 2-3 “Poder calorífico inferior en función de la humedad (Biomass Trade Center, 2008)”**

#### 2.2.1.5 Densidad

La densidad de un biocombustible sólido puede medirse a partir de un volumen sólido “real” o volumen aparente, es decir sin compactar la biomasa. Esto da origen a una densidad real o densidad aparente. La densidad real se define como la densidad del sólido sin considerar los poros entre partículas, mientras que la densidad aparente considera el volumen ocupado tanto por la fase sólida como la fase de fluidos que, en este caso principalmente es aire. La baja densidad aparente influye de forma directa en la relación de energía por unidad de volumen. Además, afecta de forma directa en la cuantificación de biomasa, en la densidad energética del combustible, transporte, almacenamiento, etc.



### **2.2.2 Industria del aserrado**

La industria del aserrado es la encargada de producir diversos productos finales como son: Tablas, listones, tablonés, vigas, pilares, etc. Durante el proceso productivo se obtienen de forma indirecta residuos importantes: corteza, aserrín, chip. El aserrín y el chip son los residuos que poseen características muy similares a la madera y deseables. Ambos son obtenidos tras el proceso de corte y cepillado, para posteriormente ser transportados a través de ductos de aire y acumulados en canchas de acopio, donde por lo general son expuestos a la intemperie.

En el caso del sector forestal chileno esta industria es lejos la más numerosa en unidades productivas, concentrando en el año 2015 un total de 1.090 aserraderos que se encontraban trabajando, lo que representa el 85,8% del total de aserraderos identificados por el VII Catastro a la Industria Forestal Primaria, realizado por INFOR en el año 2016 [6].

La empresa BETECH diseña este secador de banda continúa enfocado principalmente para aserraderos chilenos que tengan subproductos que se generan en esta industria y que a la vez posean de energía residual en forma de vapor. Permitiendo mejorar las condiciones de esta biomasa para su posterior venta o fabricación de productos como el pellet en donde su porcentaje de humedad no debe superar un 12% según los estándares internacionales que aseguran efectivamente cumple con su función tanto energética como medioambiental [7].

### **2.3 Tipos de secadores**

El secado se da como un pretratamiento obligado para la fabricación de productos que requieren un contenido bajo de humedad en la biomasa. Como se mencionó anteriormente solo se abordará el secado de la biomasa forestal específicamente del aserrín y chip. Actualmente existe una gran variedad de secadores industriales de biomasa que fabrican empresas como STELA cuyos secadores se encuentran ubicados principalmente en Europa. En Chile empresas Arauco poseen secadores de esta magnitud [8]. También existen otros secadores a menor escala. Los requerimientos para el secado de biomasa son: Una fuente de calor, un método de remoción del agua evaporada y un método de agitación para exponer



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



nuevo material al secado. Estas tres variables determinan los tipos de secadores. Los secadores se pueden clasificar según el medio de secado, mecanismo de transferencia de calor y método de transporte del material dentro del secador.

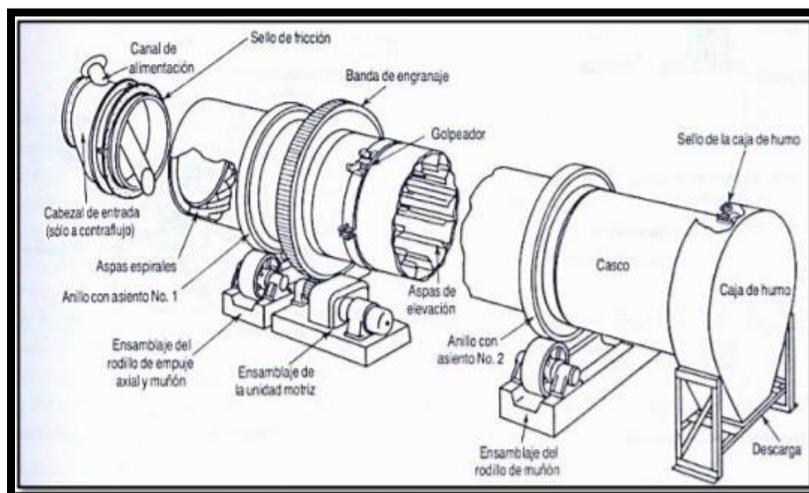
- Suministro de calor al material
  1. Convección
  2. Conducción
  3. Combinado
- Medio de secado
  1. Gases de combustión
  2. Aire
  3. Vapor
- Mecanismo de transporte del material al interior del secador.
  1. Secador de rotatorio
  2. Secador de banda
  3. Secador de tornillo
  4. Secador de lecho fluidizado

La descripción de cada uno de estos secadores escapa de los alcances de este trabajo, pero sin embargo describiremos los modelos más utilizados en la industria.



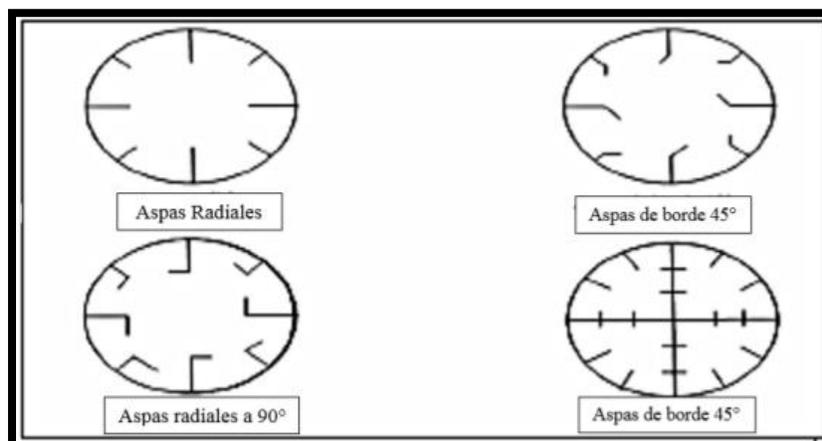
### 2.3.1 Secadores rotatorios

Actualmente dentro los secadores más utilizados en la industria son los secadores directos rotatorios, pueden ser de uno o tres pasos, pero el que más se utiliza es el secador de tambor rotatorio directo de un paso (Fig. 2-4). Normalmente la fuente de calor es un quemador o un calentador de vapor. Diversas han sido las investigaciones sobre el control de este secador



**Fig.2-4 “Secador Rotatorio (Fuente: FAO 2012)”**

para el secado de diferentes materiales, mediante técnicas como: Control predictivo no lineal y adaptativo aplicado al secado de granos de cacao, control PID, Control no lineal basado en el modelo NMPC [9],[10],[11],[12],[13].

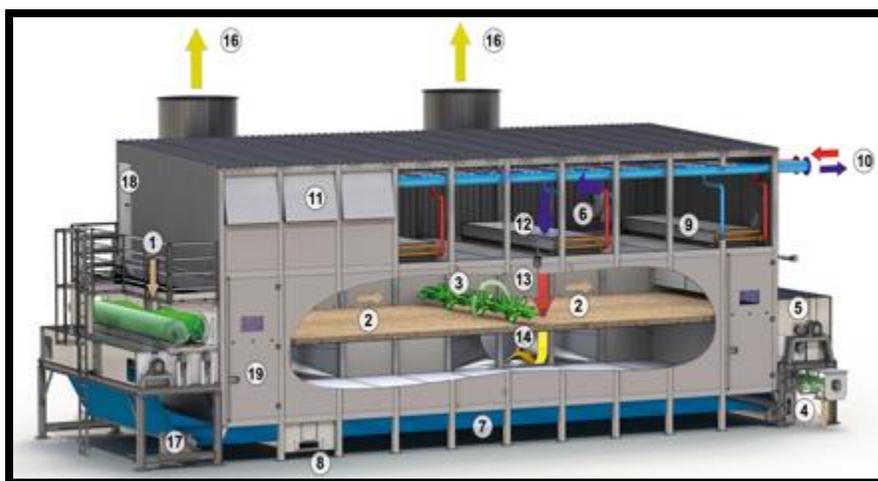


**Fig.2-5 “Aspas internas (Fuente: FAO 2012)”**



### 2.3.2 Secador de cinta

Son secadores que operan principalmente a baja temperatura que poseen una banda permeable que permite el paso hacia arriba o hacia abajo del flujo de gas, facilitando así el secado. Existen de una etapa y de múltiples etapas. Una de las mayores ventajas del secador de banda continua es que utiliza fuentes de calor de baja temperatura que principalmente están disponibles como calor residual. STELA tiene secadores de banda continua al igual que



**Fig.2-6 “Secador de banda continua. (Fuente: STELA)”**

SEVAR en donde estos comienzan a funcionar a partir de los 75°C – 90°C. Es por estos motivos que la empresa BETECH decide investigar y desarrollar un secador modular de banda continúa pensado principalmente para aserraderos.

**Tabla 2.1 Partes del secador de banda continua de STELA (Fuente: STELA)**

| N° | Descripción                          | N° | Descripción                  |
|----|--------------------------------------|----|------------------------------|
| 1  | Estación de recepción                | 10 | Suministro de calor          |
| 2  | Producto                             | 11 | Aspiración de aire fresco    |
| 3  | Dispositivo volteador                | 12 | Aire fresco                  |
| 4  | Sinfín de descarga                   | 13 | Aire de secado               |
| 5  | Limpieza de banda (en seco)          | 14 | Ventilador de aire de escape |
| 6  | Ventilador para limpieza de la banda | 15 | Aire de escape               |
| 7  | Banda textil                         | 16 | Control de marcha de banda   |



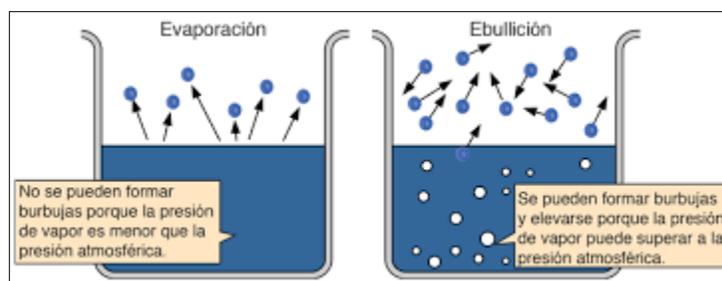
|   |                               |    |                                 |
|---|-------------------------------|----|---------------------------------|
| 8 | Limpieza de banda (en húmedo) | 17 | Acceso a campana de aire fresco |
| 9 | Intercambiador de calor       |    |                                 |

## 2.4 Principios del secado

Para comenzar este análisis se debe tener claro conceptos como la evaporación y ebullición de un líquido, para así aclarar el comportamiento de secado, el cual básicamente consiste en eliminar el agua del sólido mediante la aplicación de energía, para lo cual no es necesario llegar a una temperatura de 100°C a una presión de 1 atmósfera.

**Ebullición:** Este proceso consiste en que toda el agua enfrenta de forma conjunta un cambio de fase debido a que todas las moléculas de agua tienen la energía cinética necesaria para convertirse en vapor. Se produce a una presión de 1 atm, o lo que es igual a 1013.25 milibares, que es la que se considera normal a nivel del mar o puede ocurrir a una mayor o menor temperatura, depende directamente de la presión. Si es mayor la presión el agua ebulla a una temperatura mayor de 100 °C, por el contrario, si es menor a 1 atm la presión el agua ebulla a una temperatura menor.

**Evaporación:** Este proceso ocurre a nivel superficial de una masa de agua, a cualquier temperatura y es de carácter más lento. Este es el proceso que ocurrirá al interior del secador.



**Fig.2-7 “Evaporación vs Ebullición”**

Independiente de la forma en que el agua cambie de fase, justo encima de la superficie libre de agua, se formara una capa de vapor de agua, la cual se acumulará hasta que se sature el



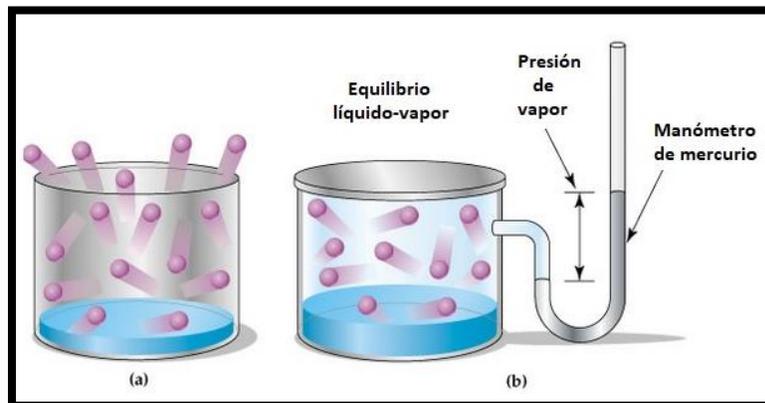
**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



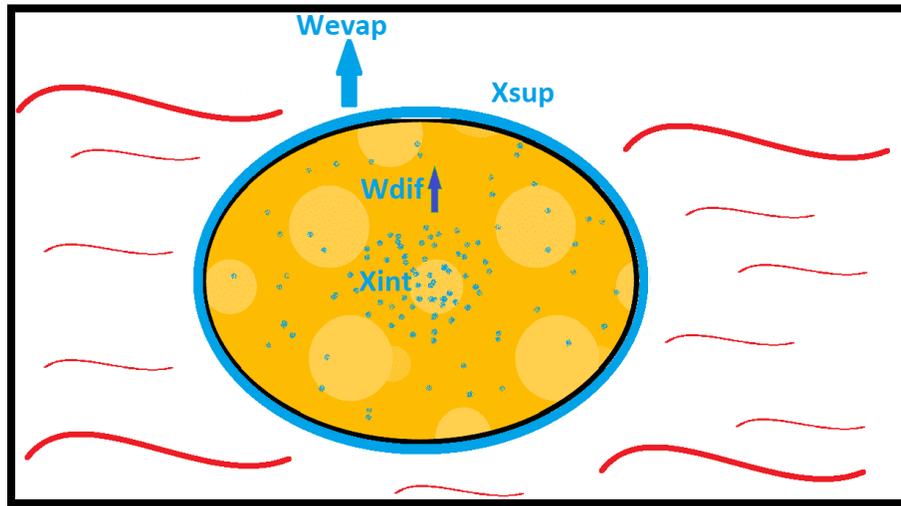
aire o antes de que se sature, se da el proceso de difusión, en donde la capa de vapor formada al estar rodeada de aire con menos de concentración de vapor de agua (menor humedad relativa), se difundirá. Es decir, este proceso se verá beneficiado cuanto mayor sea la diferencia de humedades relativas, además con la presencia de una corriente de aire, esta retirará la capa de aire húmedo que está sobre la masa de agua, cambiándolo por un aire más seco permitiendo esto que el aire nunca llegue a saturarse.

Otro factor importante es la temperatura del aire, ya que la presión de vapor de saturación del aire que se puede entender como la cantidad máxima de vapor de agua puede retener el aire es directamente proporcional a la temperatura.

Presión de vapor de saturación: Presión a la que haya tantas moléculas regresando al estado líquido, como las que escapan al estado de gas.



**Fig.2-8 “Presión de vapor de saturación”**

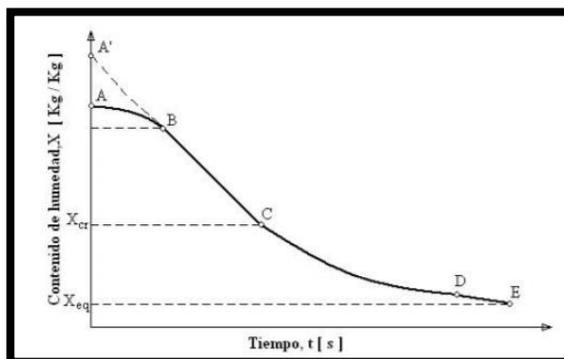


**Fig.2-9 “Variables grano de biomasa”**

El secado es un fenómeno complejo en donde la transferencia de calor es necesaria para desplazar el agua en forma de líquido o vapor en el interior del sólido y como vapor desde la superficie del sólido hacia el aire. La cinética de secado de un material relaciona la variación del contenido de agua del material y la intensidad de evaporación con el tiempo. Como se mencionó al comienzo son varios los factores que influyen. Sin embargo, los procesos de secado poseen curvas características denominadas como “curvas de secado”. Este tipo de curvas nos muestra el comportamiento del contenido de humedad del material en función del tiempo. Esta curva de secado está dividida en tramos para explicar de mejor manera el comportamiento de la humedad en el sólido, a continuación, la curva característica de secado y velocidad de secado.

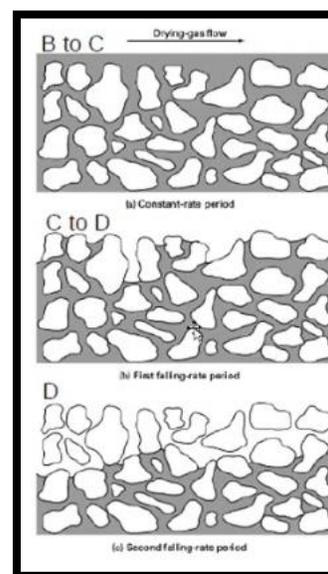
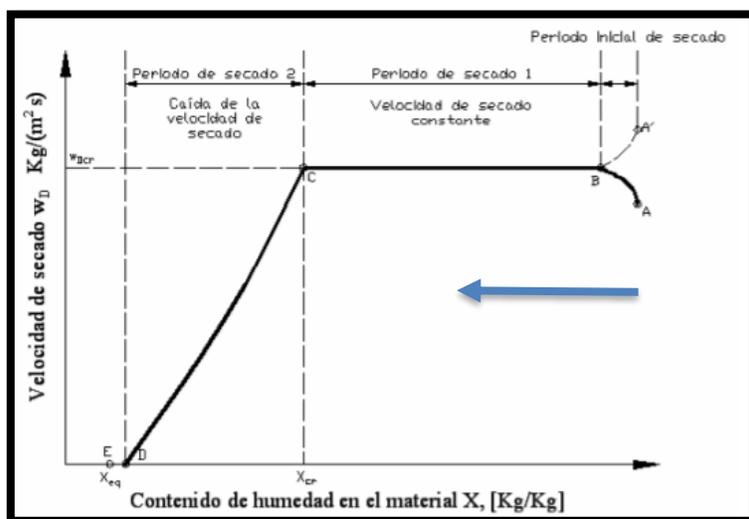


**2.4.1 Comportamiento característico de la humedad**



**Fig.2-10 “Curva característica de secado”**

En la figura 2-10 se observa una curva característica de secado de los sólidos (cantidad de humedad removida del solido respecto al tiempo), si se deriva esta grafica se obtiene la velocidad de secado (Fig.2-11).



**Fig.2-11 “Velocidad de secado”**



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



En la zona A-B está el cambio de humedad de la materia al comienzo de un proceso de secado, esta etapa puede ser de forma forzada ( $A' \rightarrow B$ , ejemplo al apretar una esponja mojada en donde se elimina el agua de forma muy rápida) lo cual hará que la velocidad de secado sea mucho mayor a lo que ocurre cuando se comienza a calentar el sólido de forma gradual ( $A \rightarrow B$ ). Al terminar este periodo, el secado se vuelve lineal (periodo B-C), la velocidad de secado se convierte en una constante este comportamiento se debe a que al agua no se le presenta una mayor resistencia, lo cual permite mantener una película de agua sobre la superficie. Finalmente, el secado se mantendrá igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico "C" o denominado humedad critica. En esta etapa la velocidad decrece considerablemente explicado por el fenómeno de la resistencia interna del sólido. Finalmente, la velocidad se hace 0 cuando se llega a la humedad de equilibrio es decir donde la línea recta (B-C) tiende a curvarse formando así una asíntota con la humedad de equilibrio.

Todo lo anteriormente señalado se debe tener en cuenta a la hora de realizar el modelado del sistema de secado, para así obtener una mejor representación del proceso.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



### **3 MODELADO Y SIMULACIONES**

#### **3.1 Modelos dinámicos de procesos de secado**

En la literatura se pueden encontrar diferentes tipos de modelamientos que varían según el sólido a secar y el tipo de secador a utilizar. En la gran mayoría se realiza el modelamiento del sistema por partes (ecuaciones parciales y totales), debido a la presencia de agua en el sólido y en el gas. Estos dos parámetros los subdividen en sólido seco, sólido húmedo, gas seco y gas húmedo, debido a la transferencia de masa y energía de forma simultánea. Algunos trabajos que realizan este tipo de análisis son [10],[16].

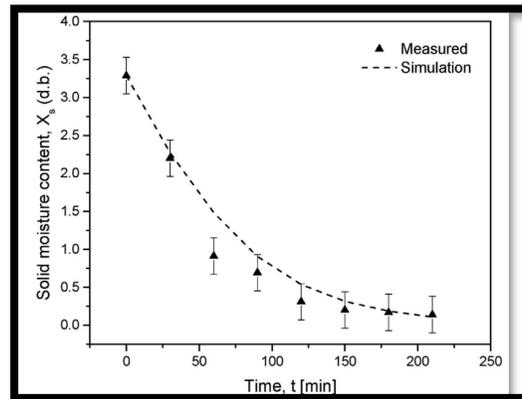
En el proceso de secado es de suma importancia saber cómo se comporta la humedad del sólido en función de las variables que intervienen en él: flujo de calor, tiempo de exposición, volumen, porosidad, tamaño de la partícula, temperatura, humedad relativa etc. Existen modelos avanzando que presentan una dificultad mayor, sin embargo, siempre el comportamiento de agua en el tiempo tendrá curvas similares a las que se presentan en la Fig.2-10 para condiciones específicas, ya que al ir variando los parámetros esta curva se modificará, lo cual provocará un cambio de valor en el modelo empírico utilizado. Esta curva



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



son el resultado del secado de residuos cítricos en secador rotatorio para ciertas condiciones las cuales se especifican en el trabajo realizado por Hugo Perazzini y otros [11].



**Fig.3-1 “Curva de secado”**

Diversos son los autores que modelan este comportamiento a través de modelos empíricos que existen en la bibliografía (Tabla 3.1) los cuales son unas de las herramientas más útiles a la hora de simplificar el estudio de los procesos de secado porque permiten determinar de forma simple y con un grado de precisión aceptable la cinética de secado, así lo afirman Jorge Villalba y Nelson de la peña basándose en trabajos realizados por diversas investigaciones [17]. Cabe destacar que  $k$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes de ajustes que las obtienes de forma experimental.



| N° | Modelo                       |   |
|----|------------------------------|---|
| 1  | Newton                       | $MR = e^{-kt}$                              |
| 2  | Page                         | $MR = e^{-k^n t}$                           |
| 3  | Henderson y Pabis            | $MR = ae^{-kt}$                             |
| 4  | Logarítmica                  | $MR = ae^{-kt} + c$                         |
| 5  | Dos términos                 | $MR = ae^{-k_0 t} + be^{-k_1 t}$            |
| 6  | Dos términos exponencial     | $MR = ae^{-k_0 t} + (1 - a)e^{-k_1 t}$      |
| 7  | Wang and Singh               | $MR = 1 + at - bt^2$                        |
| 8  | Aproximación por difusión    | $MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-k_1 t}$         |
| 9  | Verma <i>et al.</i>          | $MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-k_1 t}$         |
| 10 | Henderson y Pabis modificado | $MR = ae^{-kt} + be^{-k_1 t} + ce^{-k_2 t}$ |
| 11 | Modelo de Midilli            | $MR = ae^{-k_1 t} + bt$                     |
| 12 | White <i>et al.</i>          | $MR = e^{(-kt)^n}$                          |
| 13 | Wang <i>et al.</i>           | $MR = a + bt + ct^2$                        |

**Tabla 3.1 Modelos empíricos para humedad en el sólido.**

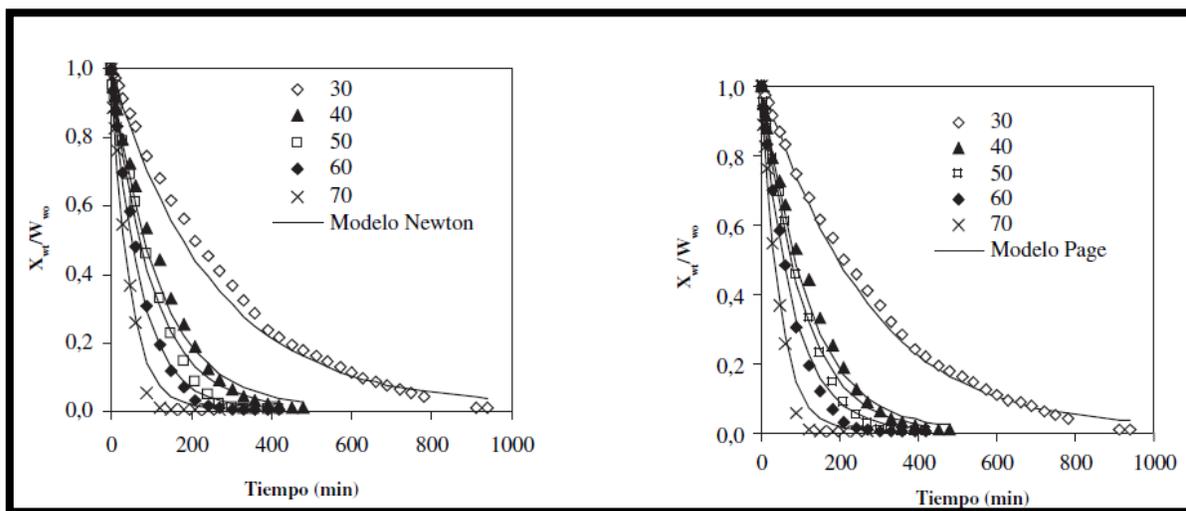
Donde MR es la relación entre la temperatura del aire de bulbo seco y la cantidad de humedad presente en cualquier mezcla de aire y vapor, también denominado humedad específica en las cartas psicométricas. Esta está presente con unidades de kg de agua / kg de aire seco, el cual es la humedad en el instante t menos la humedad en equilibrio dividido humedad inicial menos la humedad en equilibrio del sólido.

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Alumnos de la Universidad de la Serena hacen el estudio de secado para *Gracilaria Chilensis* en la cual utilizan un secador convectivo. Los resultados de las curvas de secado las modelan utilizando los primeros 3 modelos de la Tabla 3.1, en donde se pueden evidenciar el buen



ajuste que otorgan estos modelos permitiendo predecir para un determinado tiempo la humedad en el sólido.



**Fig.3-2 “Curvas de secado experimental y calculda con el modelo Newton y Page”**

El trabajo realizado por Jorge Villalba y Nelson Arzola el cual lleva por nombre “Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa” presentan modelos más avanzados y complejos para el proceso de secado. Se destaca que “esto no es trivial y aun en la actualidad se trabaja en ello”. Se indica que se debe principalmente a la complejidad propia del proceso simultaneo de transferencia de calor y masa, en donde también se debe agregar la complejidad de los compuestos biológicos sobre los que se aplican los modelos y geometrías del producto y propiedades físicas y químicas del solido a secar. En esta investigación presentan los modelos de secado en dos categorías: Modelos mecanistico cuyos se fundamentan en modelos físicos sólidos y los modelos fenomenológicos que se basan en la observación de los modelos físicos. Sin embargo, todos estos análisis presentan una dificultad mayor.

Otros estudios han desarrollado de forma mucho más clara modelamientos a partir de balances de masas, energía y en conjunto con ecuaciones de relaciones según sea el tipo de



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



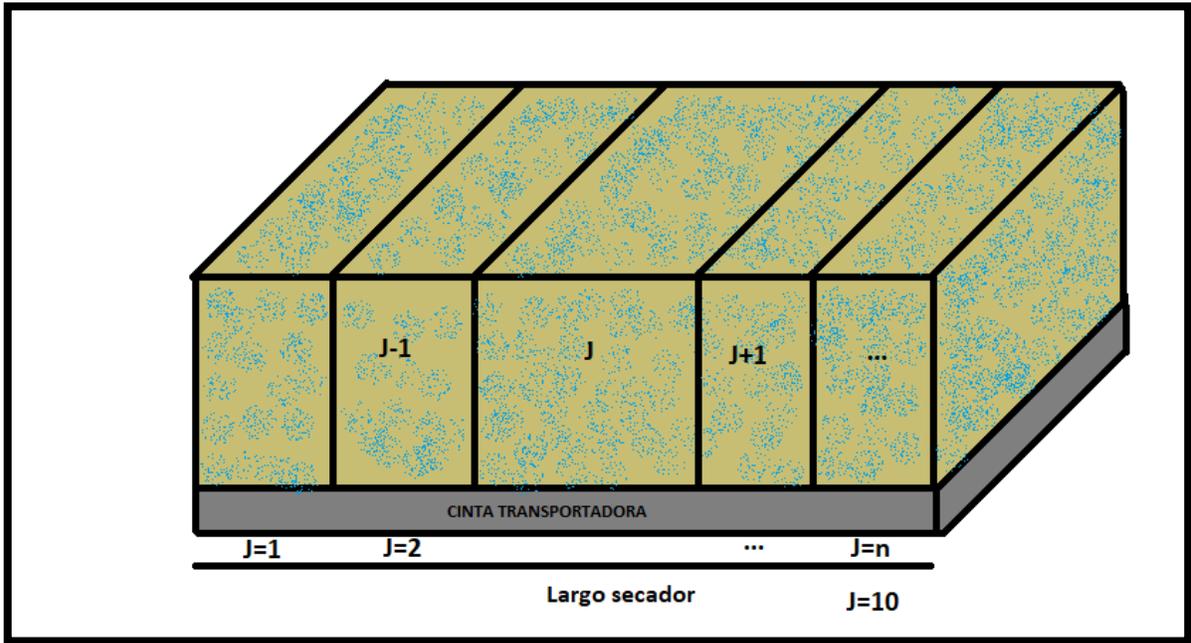
secador [12],[16],[31] con muy buenos resultados. Es por ello que en la siguiente sección se aplica este criterio para el modelado en parámetros distribuidos.

## 3.2 Modelación dinámica del proceso

A continuación, se muestran las ecuaciones basadas en investigación que modelan el secador de biomasa de banda continua para BETECH.

### 3.2.1 Consideraciones para el modelo:

- Para la modelación se considera que las variables cambian a través del tiempo y de la longitud del secador, es decir tienen una dependencia espacio - temporal ver figura 16 (modelo de parámetros distribuidos).
- Para el balance energético no se considera la transferencia de energía entre las paredes del secador y el exterior, ni entre el gas y las paredes del secador. También solo se considera que el gas de secado sale por los extractores y no hay pérdidas por los extremos del secador (por los espacios donde entra y sale la biomasa).
- El gas de secado se comporta como gas ideal
- La temperatura de la biomasa de entrada y gas de secado se consideran homogéneas.
- La biomasa en el secador está compuesta por biomasa seca (sólido) y agua en la parte exterior e interior (líquido)
- Al interior de la biomasa se produce el fenómeno de difusión, el que provoca un flujo que transporta la humedad desde el interior hacia la capa exterior de la biomasa, este flujo es denominado flujo de difusión ( $W_{dif}$ ) ver Fig. 2-9.



**Fig.3-3 “Modelo parametros distribuidos”**

### 3.2.2 Ecuaciones de balance de masas y energía:

Para este modelado se considera que el gas utilizado para el secado viene de un proceso anterior con una temperatura y energía determinada, por lo cual no se incluye el modelado del proceso de combustión u algún otro necesario para modificar las características del gas de entrada al secador por lo que estos parámetros se consideran constantes y sus valores corresponden a estimaciones entregadas por la empresa BETECH.

También se considera que la humedad total de la biomasa está compuesta por una humedad interior y exterior, Ec. N°21. Siendo la humedad externa la que se transporta por el flujo de evaporación hacia el gas de secado y la humedad interna la transportada desde el interior a la capa exterior de la biomasa por medio del flujo de difusión.

Para las ecuaciones se considera el secador de biomasa compuesto por n etapas, que son las subdivisiones del largo total del secador. Se utiliza el subíndice j en las ecuaciones de balance y de relación para representar las etapas, siendo j=1 el inicio del secador y j=n la etapa final.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



A la vez también se utilizan los subíndices e y s (entrada y salida), para diferenciar si la variable se está considerando al comienzo o al final de la etapa. La Fig. 3-5 se puede complementar con lo dicho anteriormente y entender el planteamiento del sistema de parámetros distribuidos

### 3.2.2.1 Balances de masas

#### **Balance de biomasa en base seca:**

La Ec. N°4 representa la variación en el tiempo de la cantidad de biomasa seca en el interior del secador (en Kg) y viene dada por la diferencia entre los flujos masico de entrada y salida de la sección j del secador respectivamente.

Dado que el flujo de salida de la etapa anterior es el flujo de entrada a la etapa siguiente se incluye la Ec. N°5.

$$\frac{d(mb_{s,j})}{dt} = Wb_{s,j-1} - Wb_{s,j} \quad (4)$$

$$Wb_{s,j-1} = Wb_{e,j} \quad (5)$$

#### **Balance a la humedad interna de la biomasa:**

Las siguientes ecuaciones representa la variación de la humedad interna de la biomasa con respecto al tiempo. Al igual que el balance anterior esta ecuación está dada por la diferencia entre los flujos masicos de entrada y salida en la sección j, ambos multiplicados por sus



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



respectivas humedades internas. Además, se resta el flujo masico de difusión por la humedad que sale del interior de la biomasa a la capa exterior de esta misma.

$$\frac{d(mb_{s,j} \cdot X_{int_{s,j}})}{dt} = Wb_{s,j-1} \cdot X_{int_{s,j-1}} - Wb_{s,j} \cdot X_{int_{s,j}} - Wdif_j \quad (6)$$

$$X_{int_{s,j-1}} = X_{int_{e,j}} \quad (7)$$

### **Balance a la humedad superficial de la biomasa:**

La variación de la humedad de la capa superficial o externa de la biomasa con respecto al tiempo está dada por las Ec. 8 y 8. Notar que aquí se le suma el flujo masico de difusión proveniente de la parte interna de la biomasa y se resta el flujo masico de evaporación que luego se le suma al gas de secado.

$$\frac{d(mb_{s,j} \cdot X_{sup_{s,j}})}{dt} = Wb_{s,j-1} \cdot X_{sup_{s,j-1}} - Wb_{s,j} \cdot X_{sup_{s,j}} + Wdif_i - W_{evap_j} \quad (8)$$

$$X_{sup_{s,j-1}} = X_{sup_{e,j}} \quad (9)$$

### **Balance a la humedad total de la biomasa:**

Las Ecuaciones N°10 y N°11 representan la humedad total de la biomasa con respecto al tiempo. La humedad total utilizada en este balance está dada por la Ec. N°21.

Esta vez no está presente el flujo masico de difusión dentro del balance ya que solo tiene existencia al analizar la humedad de la biomasa por partes (humedad interna y humedad externa), pero de forma global este no tiene influencia (se anula).



**UNIVERSIDAD DEL BIO BIO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$\frac{d(mb_{s,j} \cdot X_{s,j})}{dt} = Wb_{s,j-1} \cdot X_{s,j-1} - Wb_{s,j} \cdot X_{s,j} - W_{evap_j} \quad (10)$$

$$X_{s,j-1} = X_{e,j} \quad (11)$$

### **Balance de masa de gas en base seca:**

Las Ec. N°12 representan la variación con respecto al tiempo de la masa de gas de secado en base seca y está dada por las diferencias de los flujos masicos de entrada y de salida en la sección j.

$$\frac{d(mg_j)}{dt} = Wg_{s,j-1} - Wg_{s,j} \quad (12)$$

$$Wg_{e,j} = Wg_{e[1]} \quad (13)$$

Si el flujo masico de gas de entrada es constante, el flujo de gas de secado en base seca será constante a lo largo del secador (en cada etapa), Ec. N°13. Por otro lado, el gas de secado húmedo si varia debido al aporte del flujo de evaporación proveniente de la biomasa.

### **Balance a la humedad del gas:**

Por último, tenemos el balance de humedad en el gas con respecto al tiempo. Como se ve en las Ecuaciones N°14 y N°15 este también depende de las variaciones de los flujos masicos de entrada y salida en la etapa j, multiplicados con sus respectivas humedades. Además, se suma el aporte de humedad proveniente el flujo masico de evaporación proveniente de la capa exterior de la biomasa.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$\frac{d(mg_j \cdot Y_{s,j})}{dt} = Wg_{s,j-1} \cdot Y_{s,j-1} - Wg_{s,j} \cdot Y_{s,j} + Wevap_j \quad (14)$$

$$Y_{e,j} = Y_{e,[1]} \quad (15)$$

### 3.2.2.2 Balance de energía

#### Balance de energía a la biomasa:

En las Ecuaciones N°16 y N°17 se plantea el balance energético de la biomasa de forma global, es decir se considera la parte de la biomasa seca como también el agua presente en ella.

El balance esta dado por la diferencia de las entalpias que conllevan los flujos masicos de biomasa húmeda de entrada y salida en la etapa j. Sumando también la energía transferida desde el gas de secado a la biomasa (energía que hará varia la temperatura de esta). Por último, se resta la energía perdida al provocar un flujo de evaporación de la humedad.

$$\frac{d(mbh_j \cdot Hbh_{s,j})}{dt} = Wb_{s,j-1} \cdot (1 + X_{s,j-1}) \cdot Hbh_{s,j-1} - Wb_{s,j} \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j (\lambda + Hag) \quad (16)$$

$$Hbh_{s,j-1} = Hbh_{e,j} \quad (17)$$

#### Balance de energía al gas:

Nuevamente se plantean las ecuaciones considerando el gas de forma global o gas húmedo y al igual que el balance anterior y como se ve en la Ecuación N°18, depende de las variaciones de las entalpias de entrada y salida en las etapas, pero se resta la misma energía transferida desde el gas a la biomasa y se suma la energía proveniente del flujo masico de evaporación proveniente de la capa exterior de la biomasa.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Como se ve en la Ecuación N°19 la entalpia del gas húmedo de entrada es igual para todas las secciones del secador. Esto se da porque el gas llega por la parte superior y no tiene relación con la etapa anterior.

$$\frac{d(mgh_j \cdot Hgh_{s,j})}{dt} = Wg_{s,j-1} \cdot (1 + Y_{s,j-1}) \cdot Hgh_{s,j-1} - Wg_{s,j} \cdot (1 + Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j (\lambda + Hag) \quad (18)$$

$$Hgh_{e,j} = Hgh_{e,[1]} \quad (19)$$

### 3.2.3 Ecuaciones de relaciones

Relación entre la masa de biomasa húmeda y la masa de biomasa.

La humedad  $X_{s,j}$  está en base seca (Kg. agua/Kg. Biomasa seca) por lo que al ser multiplicada por la masa de biomasa seca (Kg biomasa seca) da como resultado los kg de agua presentes en la biomasa húmeda. En pocas palabras esta relación es la suma de los kg de biomasa seca más los kg de agua presentes en la masa de biomasa.

$$mbh_j = mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \quad (20)$$

Relación entre la humedad total de la biomasa y las humedades parciales. Lo que quiere decir la Ec. N°21 es que humedad total de la biomasa es la suma de la húmeda interna y la humedad de la capa superficial.

$$X_{s,j} = X_{int,s,j} + X_{sup,s,j} \quad (21)$$

La Ec. N°22 es la relación entre la humedad superficial y la humedad crítica. Mas bien esta es una restricción donde si  $X_{sup} > X_{critica}$   $Sh = 1$  y no afecta la velocidad de secado (se



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



mantiene constante). En caso contrario, si  $X_{sup} < X_{critica}$  el valor será menor a la unidad y la velocidad de secado disminuirá.

$$Sh_j = \min \left( 1, \frac{X_{sup_{s,j}}}{X_{c_{s,j}}} \right) \quad (22)$$

La Ec. N°23 es la relación para el flujo de calor desde el gas hacia la biomasa. Esta dada por los coeficientes de transferencia de calor desde el gas de secado a la biomasa ( $H_{c1}$  y  $H_{c2}$ ), multiplicado por el área o superficie de la biomasa (capa externa), por las diferencias entre las temperaturas de ambos y por la relación entre las humedades superficial y crítica.

Este último término se incluye dado que cuando hay humedad en la capa exterior de la biomasa, toda la energía aportada por el gas de secado se utiliza en eliminarla (momento donde la velocidad de secado es constante). Al eliminar esta humedad se alcanza el nivel de humedad crítica ( $X_c$ ), donde la velocidad de secado deja de ser constante y ahora es necesario invertir energía para aumentar aún más la temperatura de la biomasa y así transferir la humedad interna a la parte exterior nuevamente para seguir con el proceso de secado.

$$Q_j = h_{c1} \cdot A_k \cdot (T_{g_j} - T_{b_j}) \cdot Sh_j + h_{c2} \cdot A_k \cdot (T_{g_j} - T_{b_j}) \cdot (1 - Sh_j) \quad (23)$$

La siguiente ecuación representa el flujo de evaporación de humedad desde la superficie de la biomasa y está en función de las diferencias de temperatura, el calor latente de evaporación y las relaciones explicadas anteriormente.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$W_{evap_j} = \left( \frac{A_k \cdot h_{cl}}{\lambda} \right) \cdot (Tg_j - Tb_j) \cdot Sh_j \quad (24)$$

El agua que pasa desde la parte interna a la externa de la biomasa está dada por el flujo de difusión (Ec. N° 25), en función de la diferencia entre las humedades de las dos partes, multiplicado por la constantes de difusión.

$$W_{dif_j} = K_d \cdot (X_{int_{s,j}} - X_{sup_{s,j}}) \quad (25)$$

Relación entre el flujo masico de biomasa seca y la velocidad de avance de la biomasa se presenta en la Ec. N°26, Al tener la biomasa un desplazamiento lineal dentro del secador esta velocidad es la misma que la velocidad de la cinta.

$$W_{b_{s,j}} = K_w \cdot mb_j \cdot Vb_j \quad (26)$$

La Ec. N°27 es la relación entre flujo masico de gas seco con flujo volumétrico de gas. Donde  $\rho_g$  es la densidad del gas en kg/m<sup>3</sup>.

$$Fg_j = Wg_{s,j} \cdot \frac{(1 + Y_{s,j})}{\rho_g} \quad (27)$$

La Relación entre el flujo de evaporación  $W_{evap}$  con la velocidad de evaporación  $V_{evap}$  esta dada por la Ec. N°28.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$W_{evap_j} = V_{evap_j} \cdot m b_j \quad (28)$$

La entalpía del gas húmedo esta dado por la suma de la entalpía del gas seco sumado a la entalpía del vapor de agua contenida en él. En la Ec. N°29 el valor 1.004 es el calor especifico promedio del aire, de esta forma la entalpía gas seco está dada por la multiplicación del calor especifico por la temperatura del gas.

$$H_{g_{s,j}} = T_{g_{s,j}} \cdot 1.004 \quad (29)$$

El calor latente de vaporización a 0°C es 2501 KJ/Kg, el calor especifico promedio del vapor de agua es 1.88 KJ/Kg. Ahora si se considera como unidad de masa de aire seco 1 kg, este contendrá X kg de vapor de agua, por lo que la entalpía del vapor de agua estará dada por:

$$H_{vapor_{s,j}} = Y \cdot (1.88 \cdot T_{g_{s,j}} + 2501) \quad (30)$$

Conociendo ya las entalpias del gas seco y la del vapor de agua, se puede obtener la entalpía del gas húmedo como la suma de ambas entalpias, dando paso a la Ec. N°31.

$$H_{gh_{s,j}} = T_{g_{s,j}} \cdot 1.004 + Y_{s,j} \cdot (1.88 \cdot T_{g_{s,j}} + 2501) \quad (31)$$

De esta misma ecuación y conociendo el valor de la entalpía del gas húmedo es posible conocer la temperatura del gas haciendo el despeje de Tg.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$\begin{aligned} Hgh_{s,j} &= 1.004 \cdot Tg_{s,j} + Y_{s,j} \cdot (1.88 \cdot Tg_{s,j} + 2501) \\ Hgh_{s,j} &= 1.004 \cdot Tg_{s,j} + Y_{s,j} \cdot 1.88 \cdot Tg_{s,j} + Y_{s,j} \cdot 2501 \\ Hgh &= (1.004 \cdot + Y_{s,j} \cdot 1.88) \cdot Tg + Y_{s,j} \cdot 2501 \\ Hgh_{s,j} - Y_{s,j} \cdot 2501 &= (1.004 \cdot + Y_{s,j} \cdot 1.88) \cdot Tg_{s,j} \\ Tg_{s,j} &= \frac{Hgh_{s,j} - Y_{s,j} \cdot 2501}{(1.004 \cdot + Y_{s,j} \cdot 1.88)} \end{aligned}$$

Al considerar el aire de secado como gas ideal se plantea la siguiente ecuación de flujo masico del gas húmedo en función de la densidad de un gas ideal y el flujo volumétrico del gas.

$$\begin{aligned} Wgh_{e,j} &= Fg_{e,j} \cdot \rho_g \\ Wgh_{e,j} &= Fg_{e,j} \cdot \frac{pmg \cdot Pat}{R \cdot (Tg_{e,j} + 273)} \end{aligned} \quad (32)$$

De la Ec. N° 33 se obtiene la entalpia de la biomasa en base húmeda. Aquí se considera la energía que aporta el agua y también la energía que aporta la biomasa seca.

$$Hbh_{s,j} = Tb_{s,j} \cdot (mb_j \cdot Cpm + mb_j \cdot X_{s,j} \cdot Cpa) \quad (33)$$

### 3.3 Uso de ECOSIMPRO

EcosimPro es un software que permite la simulación dinámica de procesos mediante el planteamiento de ecuaciones matemáticas específicamente ecuaciones diferenciales y algebraica además de simular eventos discretos.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Esta herramienta utiliza un lenguaje propio llamado (EL) Utilizando el lenguaje de modelado propio de EcosimPro (EL), el modelador puede encapsular los datos y el comportamiento dinámico del sistema en componentes reutilizables que ofrecen una interfaz pública bien definida pero que esconden las complejidades de su realización interna.

La tecnología de modelado orientado a objetos que EcosimPro adopta, permite la creación de modelos dinámicos complejos a partir de la interconexión de sus componentes constituyentes, estimulando así una metodología de trabajo, que resulta muy productiva, de reutilización de componentes parametrizables que ya estén bien probados.

Aquí no se trata de generar código para ser ejecutado en determinada plataforma informática, sino principalmente de obtener, a partir de los modelos de los componentes individuales, una descripción matemática correctamente planteada, en forma de un sistema de ecuaciones algebraicas y diferenciales, para el sistema en su conjunto. El modelo matemático así obtenido, puede ser estudiado desde diversos ángulos, dependiendo de que variables sean consideradas incógnitas y cuales datos. Esta es una decisión que debe realizar el usuario del modelo (siempre asistido por la herramienta) al definir las así llamadas particiones. Con esta información, EcosimPro estaría en disposición de ordenar las ecuaciones, asignando una causalidad computacional que está intencionalmente ausente en el modelo de partida. Para ello, debe decidir qué variables son calculadas a partir de cuales otras y utilizando qué ecuaciones. Durante este proceso, pueden aparecer eventualmente bloques de variables intrínsecamente relacionadas que sólo pueden ser resueltas de conjunto. También pueden aparecer como incógnitas variables que aparecen como implícitas en ecuaciones no lineales o en tablas de datos que EcosimPro no es capaz de despejar. Estas variables (y las ecuaciones que las relacionan) forman lazos algebraicos y para resolverlos, EcosimPro debe acudir a los llamados algoritmos de tearing. Lo anteriormente se encuentra en [27],[28],[29] de una forma más profunda.

Para comenzar a utilizar el software EcosimPro debemos generar un Workspace, en el cual desarrollaremos nuestro código, definimos nuestras librerías, simulaciones, etc. Los pasos



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



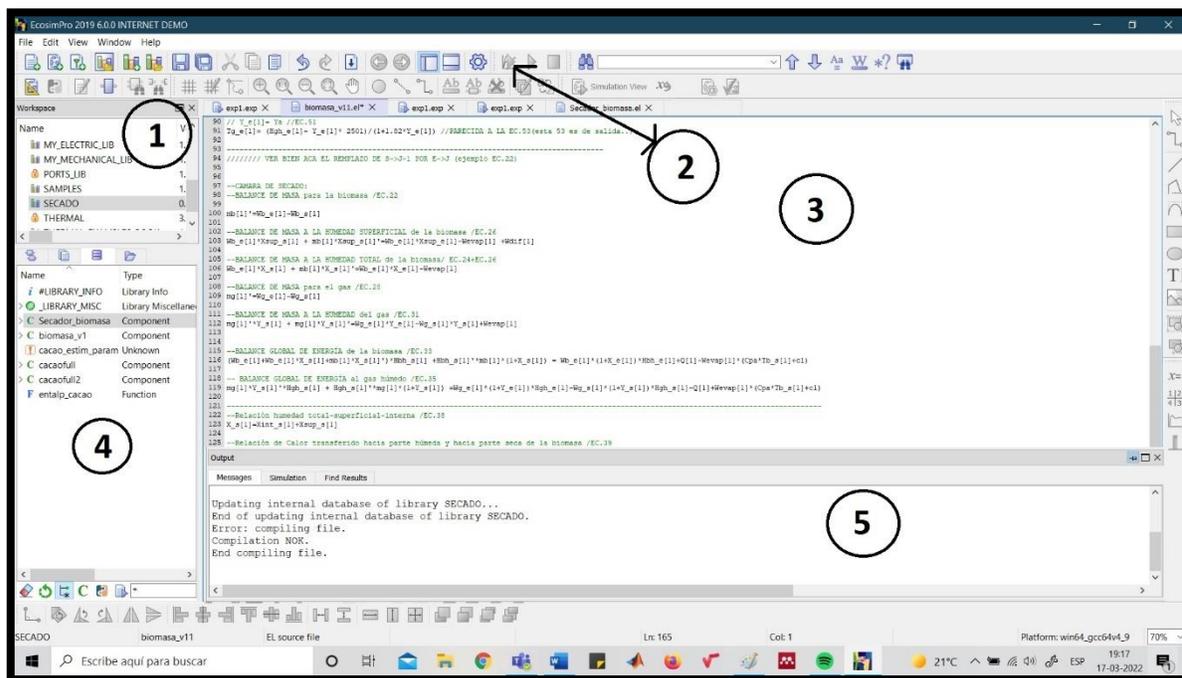
que llevan a crear este espacio de trabajo son: File> New Workspace. A continuación, se debe introducir alguna librería existente o crear una nueva. Lo cual se genera mediante File > New > Library. A continuación, se abre una ventana de texto en la cual se debe escribir las constantes, ecuaciones, etc.

Entre COMPONENT y END COMPONENT se debe escribir el código. Al interior hay diversas secciones como DATA, DECLS, CONTINUOS. En la sección DATA se establecen los datos como constantes es decir parámetros que posean un valor fijo antes de comenzar con la simulación.

En la sección DECLS contendrá las variables dinámicas que el software deberá calcular a no ser que sean variables de contorno que el usuario tendrá que especificar.

En la penúltima sección de CONTINUOS se declaran las ecuaciones diferenciales que describen nuestro secador de biomasa, las cuales varían con respecto al tiempo. Cabe destacar que el software no tendrá problemas para resolver si las ecuaciones no están en orden.

En la última sección EXPAND BLOCK se especifican las nuevamente las ecuaciones las cuales varían en cada etapa hasta “m”. Estas ecuaciones diferenciales se resuelven en cada etapa tomando los valores anteriores. Es decir, realiza la conexión internamente de cada etapa con la posterior optimizando el código para la resolución de las ecuaciones diferenciales [30].



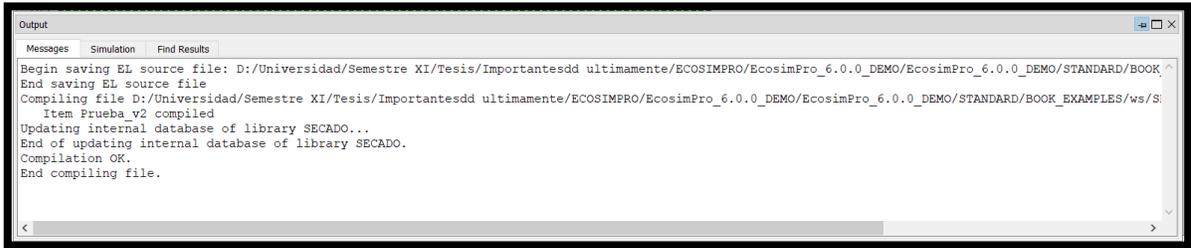
**Fig.3-4 “Pestaña principal del software EcosimPro”**

Se presentan 5 secciones principales

1. 1.-Librerías utilizadas
2. 2.-Simulador de experimentos
3. 3.- Programación código
4. 4.-Ficheros
5. 5.-Apartado de dialogo de errores

Una vez escritas todas las ecuaciones en conjunto con los parámetros, se debe realizar una compilación del código actual. Esto se realiza con icono “compile”, en donde si esta correcto se mostrara en los mensajes de salida “Compilation Ok” como se observa en la siguiente imagen.

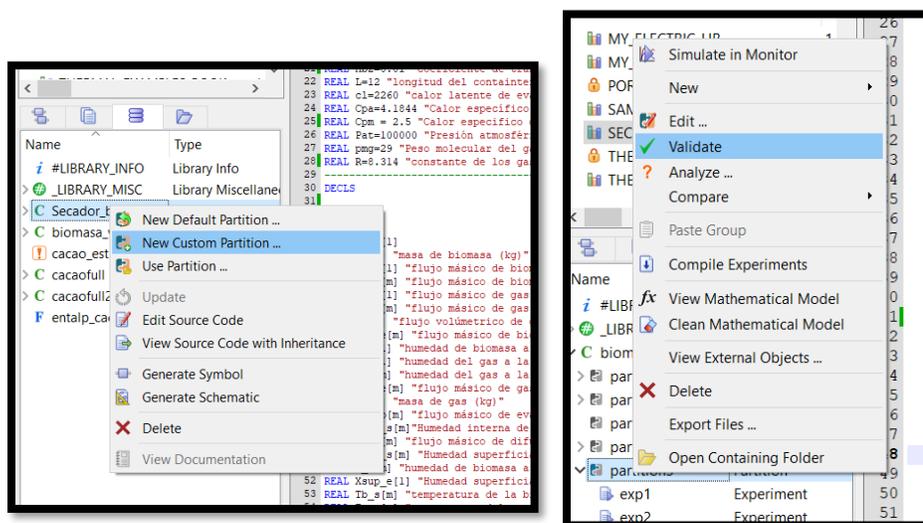
Una vez compilado verificamos el componente creado se comprueba que se añadió a la pestaña de ítems.



**Fig.3-5 “Apartado de dialogo de errores”**

Una vez compilado el código se debe realizar una partición. Esta completa el modelo matemático de un componente. Ahora, se pueden realizar hasta cuatro operaciones distintas en esta estructura [Bibliografía Modelo en ECOSIMPRO]:

- Determinar las variables sobre las que se impondrán las condiciones de contorno (el establecimiento de estas se realizará en el experimento).
- Indicar a EcosimPro como romper los lazos algebraicos, seleccionando la variable a utilizar en el algoritmo de rotura de lazos.
- Seleccionar las variables de estado que se utilizarán para realizar la reducción del modelo en el caso de índice superior.
- Cambiar una constante para realizar simulaciones paramétricas.



**Fig.3-6 “Creación de una partición”**



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Una vez realizada la partición debemos validar la partición como se observa en la siguiente imagen. Una vez realizado el paso anterior podemos crear un experimento (Clic derecho sobre la partición creada -> New -> Experiment) el cual nos permitirá ver gráficamente los resultados de la resolución del modelo matemático una vez realizado las configuraciones según sea el caso.

El experimento es donde se realiza la simulación en sí. Posee “3” secciones principales: INIT (Se fijan las condiciones iniciales), BOUNDS (Se fijan las condiciones de contorno), BODY (Se define diferentes parámetros como el tiempo de inicio y termino de la integración, método de integración, paso de integración, etc.)

```

39 BODY
40 -- creates an ASCII file with the results in table format
41 REPORT_TABLE("results.rpt", "*", TRUE)
42
43 -- set the debug level (valid range [0,4])
44 DEBUG_LEVEL= 1
45 -- select default integration solver. Valid methods are IDAS (_SPARSE), DASSL(_SPARSE), CVODE_BDF(_SPARSE), CVODE_AM, RK4, EULER, AM1, AM2 and A
46 IMETHOD= IDAS -- default is DASSL, recommended is either IDAS or IDAS_SPARSE
47 -- set tolerances and other important inputs
48 REL_ERROR = 1e-06 -- transient solver relative tolerance
49 ABS_ERROR = 1e-06 -- transient solver absolute tolerance
50 TOLERANCE = 1e-06 -- steady solver relative tolerance
51 INIT_INTEG_STEP = -1 -- initial integration step size (-1 means use the solver estimation)
52 MAX_INTEG_STEP = -1 -- maximum integration step size (-1 means use the solver estimation)
53 NSTEPS = 1 -- Only for explicit solvers use CINT/NSTEPS as integration step size
54 REPORT_MODE = IS_EVENT -- by default it reports results at every CINT and event detection. Other valid options are IS_STEP, IS_CINT and IS_MANUA
55
56 -- simulate a transient in range[TIME,TSTOP] reporting every CINT
57 TIME = 0
58 TSTOP = 36000
59 CINT = 1000
60 INTEG()
61 END EXPERIMENT
62

```

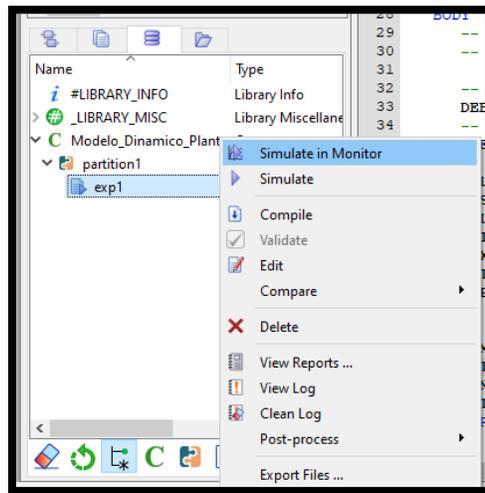
**Fig.3-7 “Configuración de experimento”**



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Ya configurados los parámetros, se procede a realizar la compilación del experimento. Una vez Ok la compilación, podemos simular el experimento permitiendo visualizar las variables que sean de interés. Esta visualización se logra una vez presionado “Simulate in Monitor” lo cual me abrirá una nueva ventana. En esta ventana presionar New Plot-> y buscar las variables de interés.



**Fig.3-8 Ventana de visualización grafica**

En el Anexo N°4 se puede ver la programación de las Ecuaciones 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 32, 33 en este software, las que darán paso a las siguientes simulaciones.

A las ecuaciones 16 y 18 se le realizó trabajo algebraico previo a la programación en el Software, esto se puede ver en el Anexo N°3

También el cálculo de parámetros como el área de transferencia, la velocidad de la cinta y propiedades del gas de secado se muestran en los Anexos N°1 y N°2.

### **3.4 Análisis de los resultados**

Para comenzar el análisis se debe recordar que el modelo se realiza considerando parámetros distribuidos permitiendo así visualizar y considerar su evolución de las diferentes variables



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



en relación con la posición y tiempo. La resolución de cada etapa toma como valores iniciales los resultados de la etapa anterior para la resolución de la etapa siguiente y así hasta la etapa de salida.

En el software Ecosimpro se programa la resolución de las ecuaciones diferenciales para 10 etapas, este valor se justifica mediante el argumento de que en las etapas 9 y 10 la humedad alcanzada de la biomasa ya no varía considerablemente una respecto a la otra, por lo que aumentar este valor no se justifica.

El software según las ecuaciones programadas en el código principal sugiere dar valores a una cierta cantidad de variables de entrada con las que es capaz de resolver las ecuaciones diferenciales. Las variables seleccionadas para este primer experimento se pueden ver en la Tabla 3.2 y la programación en el Anexo N°5.

**Tabla 3.2 Condiciones iniciales**

| <b>Variable</b> | <b>Valor</b> | <b>Unidad de medida</b> | <b>Descripción</b>   |
|-----------------|--------------|-------------------------|--|
| Ak              | 0.2143       | m <sup>2</sup>          | Área de transferencia                                      |
| Tb_e[1]         | 10           | °C                      | Temperatura de biomasa de entrada al secador               |
| Tg_e[1]         | 80           | °C                      | Temperatura del gas de entrada al secador                  |
| Wbh_e[1]        | 0.0125       | Kg/s                    | Flujo masico de biomasa húmeda de entrada al secador       |
| Wgh_e[1]        | 5            | Kg/s                    | Flujo masico de gas húmedo a la entrada del secador        |
| X_e[1]          | 1.26         | Kg agua/Kg biomasa seca | Humedad total de la biomasa a la entrada del secador       |
| Xsup_e[1]       | 0.9          | Kg agua/Kg biomasa seca | Humedad superficial de la biomasa a la entrada del secador |



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



|                    |      |                     |   |
|--------------------|------|---------------------|---|
| Y <sub>e</sub> [1] | 0.12 | Kg agua/Kg gas seco | Humedad del gas de secado de entrada al secador |
|--------------------|------|---------------------|---|

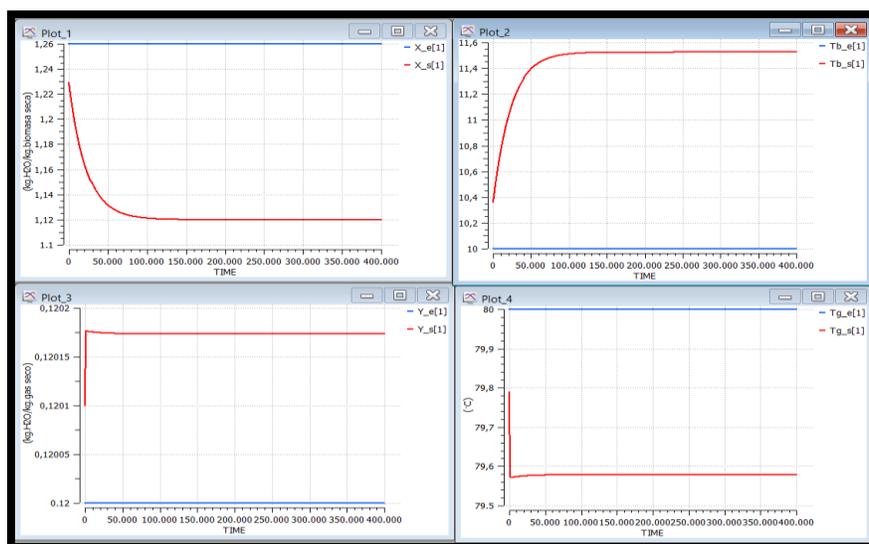
Para el cálculo del área de transferencia se consideran las dimensiones del manto de biomasa y también la porosidad. Este último parámetro, como también la humedad de la biomasa y la del aire de entrada fueron medidos en un estudio realizado por un alumno del área de mecánica de la misma universidad, quien realizó estudios a la biomasa a utilizar por BETECH [26]

A continuación, en la Fig. 3-11 se muestra la evolución de la humedad y temperatura tanto para el gas de secado como para la biomasa. Se utilizó un  $n=1$ , por lo tanto las variables  $X_s[1]$ ,  $T_b_s[1]$ ,  $Y_s[1]$ ,  $T_g_s[1]$  deben interpretarse la salida de la primera sección del secador, es por esto que no se ven grandes evoluciones con respecto a los valores de entrada.

Hay que recordar que la cantidad etapas total se encuentra cuando ya no se ve una evolución significativa entre la etapa  $n$  y la etapa  $n-1$ .

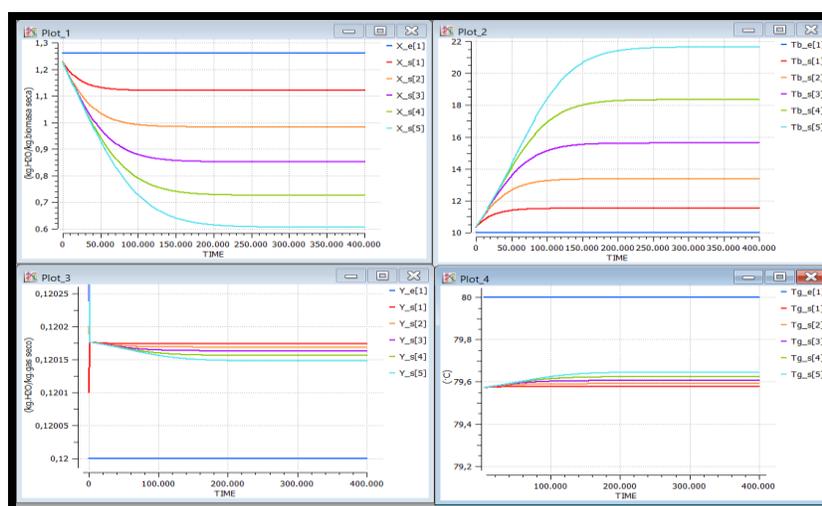


**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**Fig. 3-9 “Humedad y temperatura de la biomasa y gas de secado para N=1”**

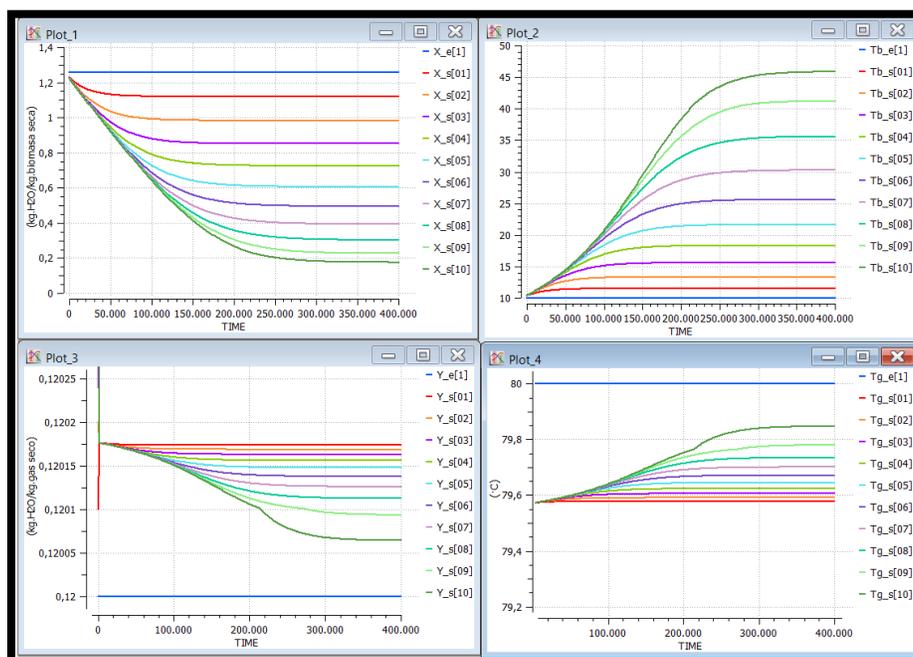
Para un valor  $n = 5$  ya se puede ver una evolución más significativa de las variables, alcanzando una humedad total en la biomasa de 0.6 [kg agua/kg biomasa seca] aproximadamente y una temperatura cercana a los 22°C.



**Fig. 3-10 “Humedad y temperatura de la biomasa y gas de secado para N=5”**



Ya para un  $n=10$  se puede ver que  $X_s[9]$  y  $X_s[10]$  no tienen una diferencia muy significativa en los valores en los que se estabiliza y dado que el software en versión estudiante (gratuito) no permite realizar iteraciones para  $n>10$ , nos quedamos con la salida  $X_s[10]$  como la etapa de salida del secador.



**Fig. 3-11 “Humedad y temperatura de la biomasa y el gas de secado para N=10”**

Según el flujo masico de biomasa húmeda de entrada, y el área del manto de biomasa se puede obtener la velocidad de la vinta. El valor para este experimento es  $v_c = 4.3804 \cdot 10^{-5}$  [m/s]. Conociendo la velocidad y que el largo del container es de 12 metros, se puede saber que en el tiempo 274.000[s] saldrá la biomasa del secador (equivalente a 76 horas). o

El modelo fue ajustado para que el largo del secador (en conjunto con la velocidad de la cinta) coincidiera con el tiempo donde se estabilizan las curvas de secado



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



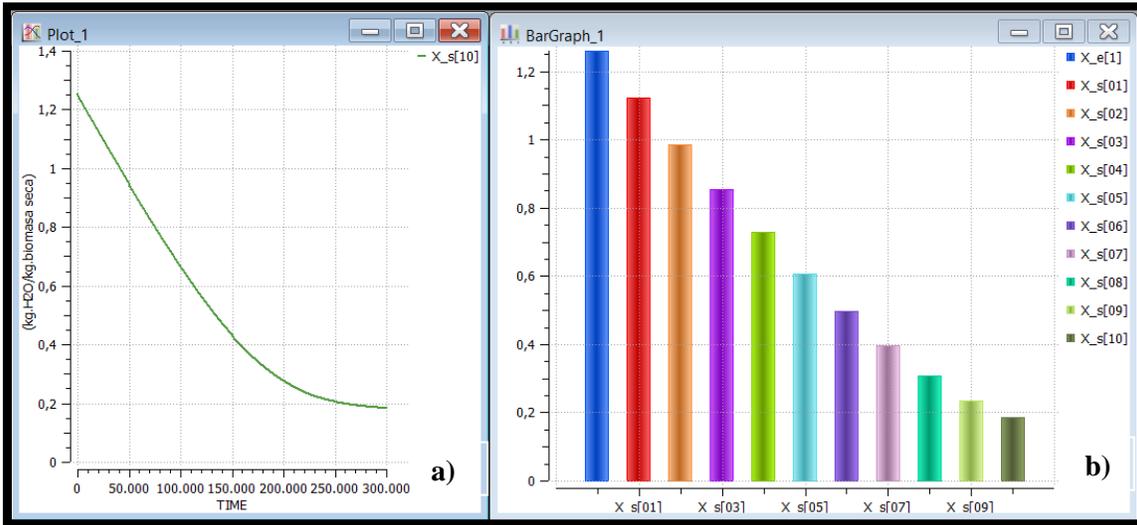
Con la humedad específica de salida de 0.2 [Kg agua/Kg biomasa seca] y sabiendo que el flujo de biomasa seca es constante e igual a 0.0053[Kg/s], se puede calcular el flujo de biomasa a la salida del secador de la forma:

$$Wbh\_s[10] = 0.0053 \cdot (1 + 0.2) = 0.0066 \left[ \frac{Kg}{s} \right] \quad (34)$$

Equivalentes a 23.8[Kg/h].

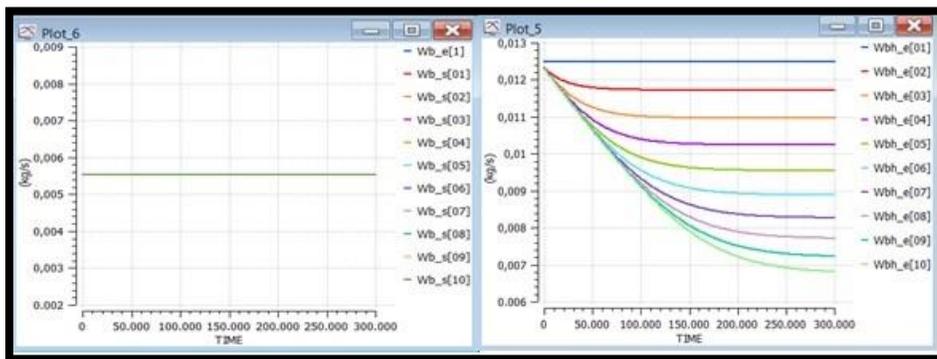
Como hemos dicho, lo ideal es buscar un valor n de etapas lo más ajustado al nivel mínimo de humedad que se logre alcanzar, bajo las condiciones de entrada que se entregan. Con este valor de n-etapas y según el largo del secador, conoceremos la longitud de cada sección, también el comportamiento y el valor de las variables a la entrada o salida de esta (según el índice s=salida o e=entrada).

Con respecto al eje x se puede ver como sería el comportamiento en el tiempo de la variable, como por ejemplo en la Fig. 3-14.a, donde está graficada la evolución de la humedad desde inicio hasta la salida de la última etapa  $X\_s[10]$ . También en la Fig. 3.14.b se presenta un gráfico de barras donde se puede de otra forma más fácil las humedades de salida de por sección del secador.



**Fig 3-12 “Humedad de la biomasa [Kg agua / Kg biomasa seca]”**

En cuanto a los flujos masicos es de esperar que la biomasa húmeda disminuya a medida que se pierde humedad y se acerca a la salida. Por otro lado, el flujo de biomasa seca no cambia, como se ve en la Fig.3-15.

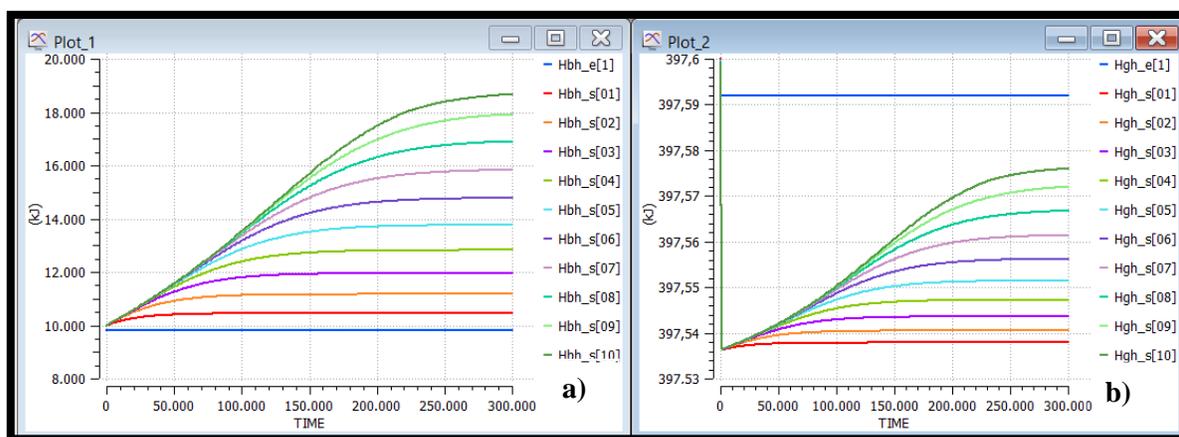


**Fig. 3-13 “Flujos masicos biomasa seca y humeda [Kg/s]”**



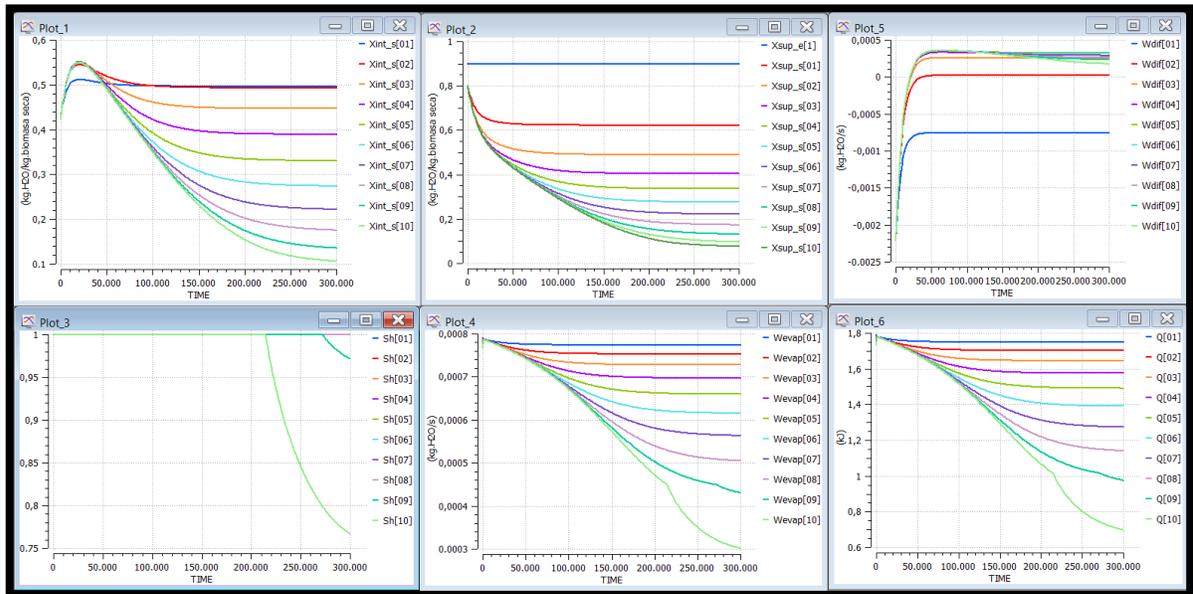
En la Fig. 3-16.a se aprecia la entalpía de la biomasa, la cual aumenta a medida que cambia de etapa y se acerca a la salida del secador.

Por otro lado, y sabiendo que las propiedades del gas de entrada para cada etapa son las mismas, la entalpía del gas de secado también aumenta a medida que se acerca a la salida del secador, ver Fig. 3-16.b. Esto dado que ya no hay una transferencia tan alta de energía con la biomasa. El señalamiento anterior implica que el flujo de evaporación sea cada vez menor.



**Fig. 3-14 “Entalpía del gas de secado y biomasa”**

En la Fig. 3-17 se presentan otras variables del proceso. Se ve que la humedad superficial al ser igual o menos a la humedad crítica (cuyo valor es  $h_c = 0.1$ ) el valor de la variable  $sh$  toma valores menores a 1, lo que provoca que el flujo de evaporación y la transferencia de calor tengan comportamientos no lineales. Esto obviamente afecta a la velocidad de secado provocando que deje de ser constante.



**Fig. 3-15 “Comportamiento de otras variables de la planta”**

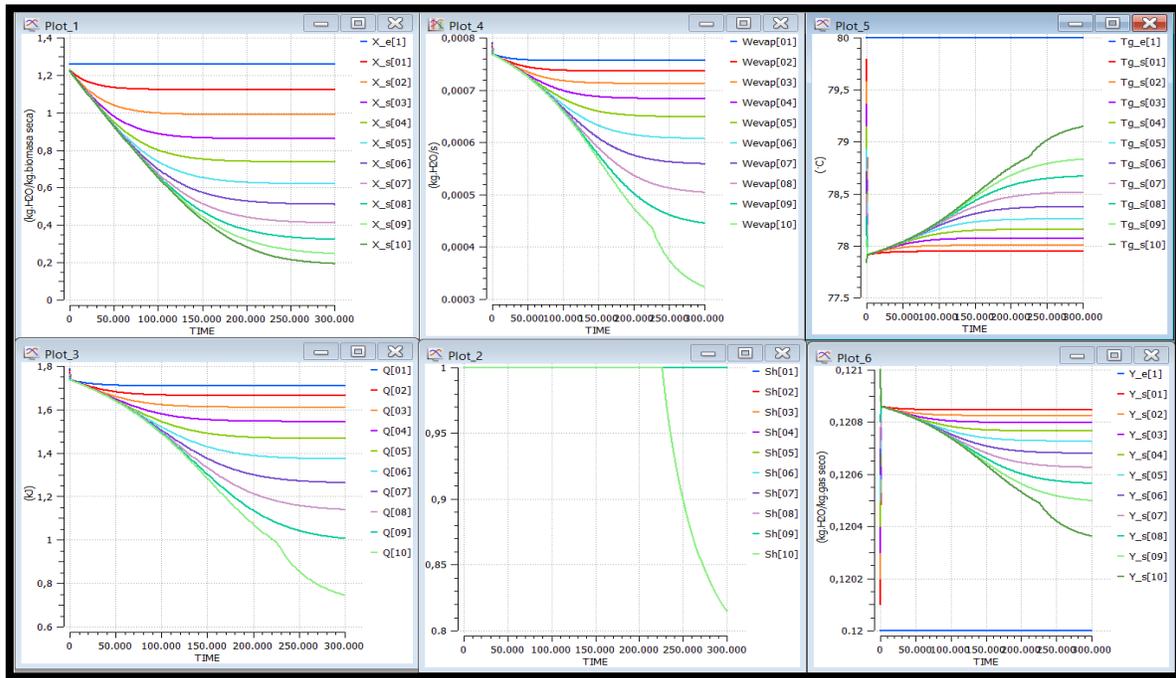
### 3.4.1 Efectos de la variación de los parámetros de entrada

Hay variables dentro del modelo que pueden ser más sensibles que otras respecto a los cambios que provocan en la respuesta del modelo. Una de estas es el flujo masico de gas de secado de entrada.

Las siguientes simulaciones se deben de comparar con las gráficas obtenidas en la sección 3.4

#### 3.4.1.1 Variación del flujo masico de gas de secado

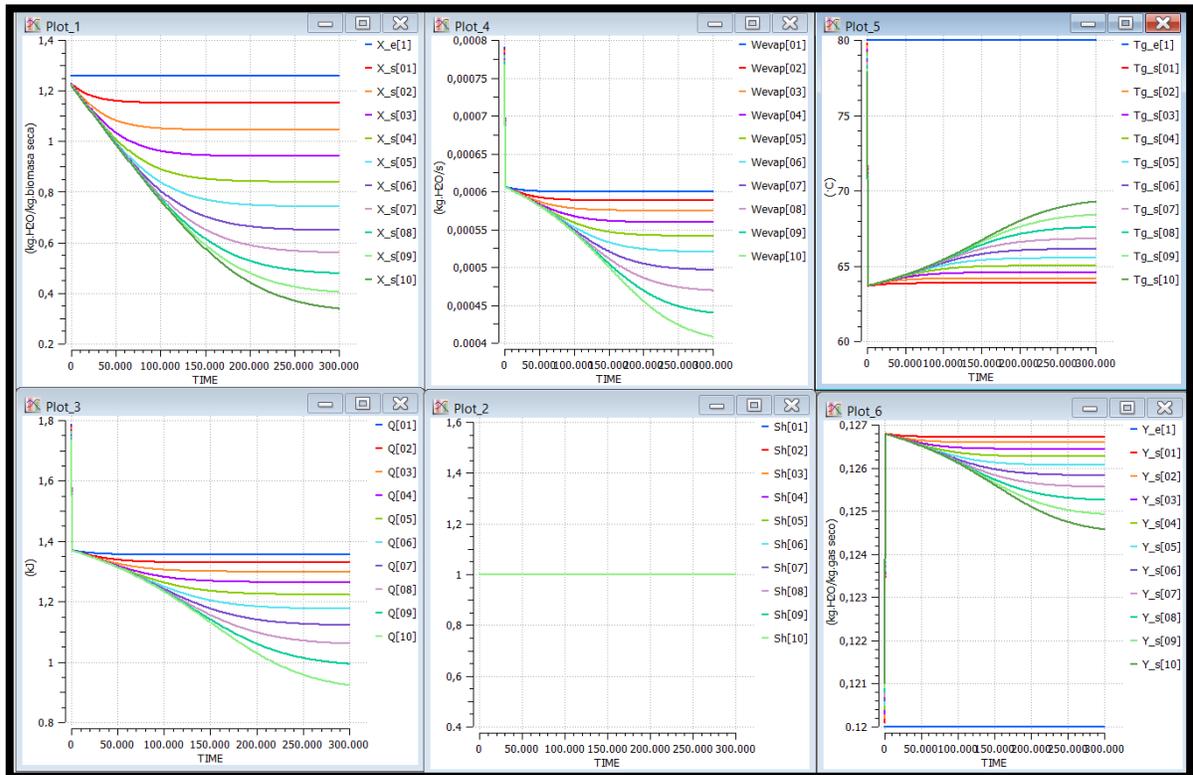
Un flujo masico de gas mal ajustado al modelo provocara el que la masa de gas al interior del secador aumente demasiado su humedad y disminuya su temperatura. Esto provoca que el flujo de evaporación (Wevap) y la transferencia de calor a la superficie de la biomasa (Q) disminuya, ya que son dependientes de la diferencia de temperatura entre el gas y la biomasa. Esto también provocaría la disminución de la velocidad de secado



**Fig. 3-16 “Variables de la planta ante una disminución del flujo masico de gas de secado ( $W_{gh}=1[\text{Kg/s}]$ )”**

Como se puede ver en la Fig. 3-18, con un flujo masico de gas de entrada de  $1[\text{kg/s}]$  la temperatura del gas a tomado valores más bajos a la mostrada en graficas anteriores y la humedad ha aumentado, por ende, la gráfica de humedad en la biomasa para  $X_s[10]$  al tiempo  $274.000[\text{s}]$  aumento el valor de humedad.

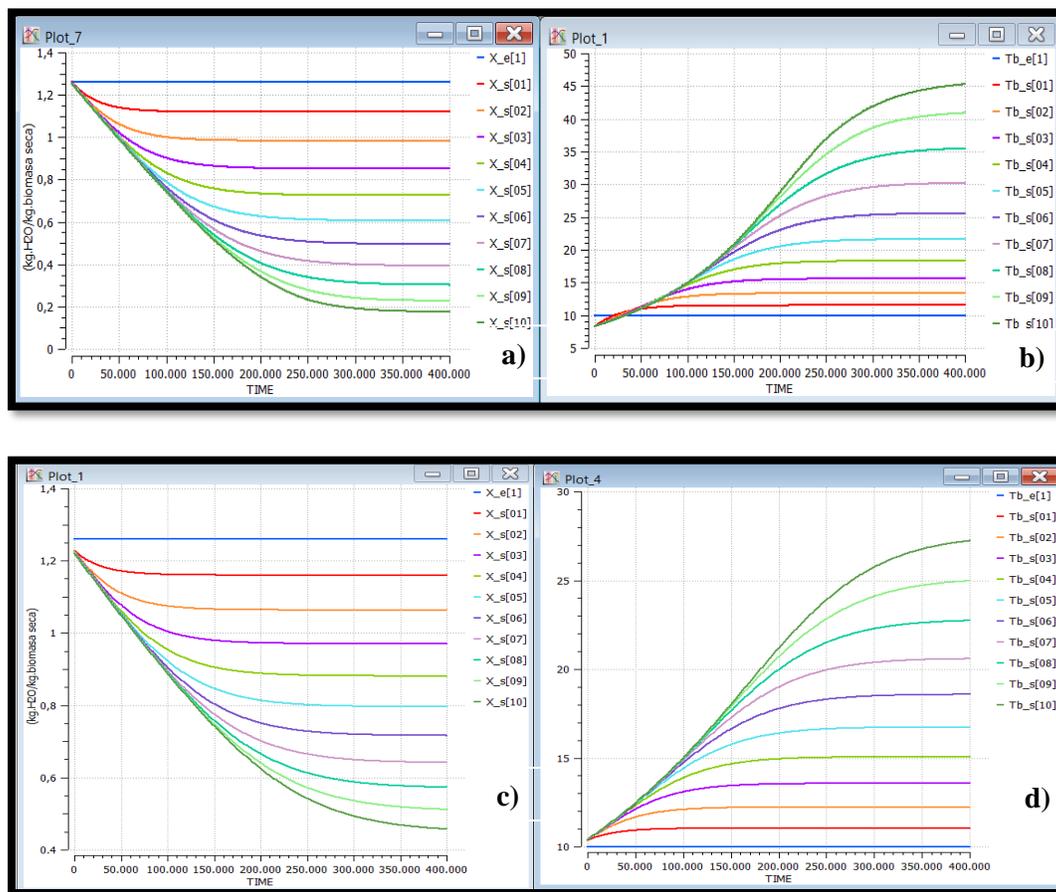
Mas claro se puede ver en la Fig. 3-19 donde se disminuyó aún más el flujo masico de gas de entrada (a  $0.5 \text{ Kg/s}$ ). En esta simulación la humedad superficial no alcanza a ser inferior a la crítica y la humedad total de la biomasa ya es mucho más alta.



**Fig. 3-17 “Variables de la planta ante disminución del flujo masico de gas de secado (Wgh=0.5[Kg/s])”**

### 3.4.1.2 Temperatura del gas de secado

Como ya se explicó, si la temperatura del gas de secado es muy baja puede provocar cambios significativos en el proceso de secado. En las Fig. 3-20.c y Fig. 3-20.d se muestra lo que sucede si la temperatura del gas de entrada es 50°C (Fig. 3-20.a y Fig. 3-20.b es lo que sucede con 80°C, se muestra para facilitar comparación). Aquí se puede ver el nivel de humedad ya es mucho más alto y la temperatura de la biomasa incrementa solo algunos grados.



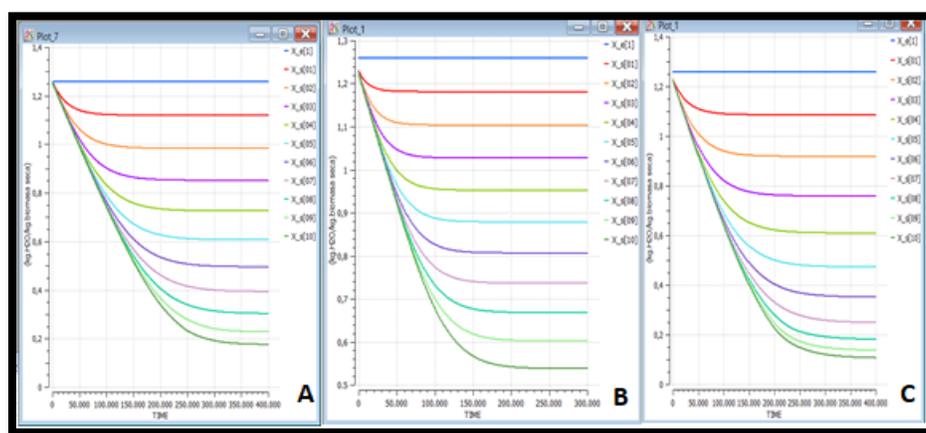
**Fig. 3-18 “Efecto de la disminucion de temperatura del gas de secado a 50°C”**

### 3.4.1.3 Flujo masico de biomasa de entrada

El aumento del flujo masico de biomasa implica que la velocidad de la cinta aumente, ya que como se dijo, las dimensiones del manto de biomasa son constante. Esto implica que ahora en la Fig 3-21.b, con un  $W_{bh\_e[1]} = 0.0225$  en el tiempo 152.192[s] ya estaría saliendo la biomasa del secador y con más humedad. Aquí se puede observar que las secciones  $X_s[9]$  y  $X_s[10]$  no están cercanas, lo que implica que aún falta por acercarse al nivel de humedad en equilibrio y proyectando posibles curvas para  $n > 10$  es posible deducir que el largo del secador es muy poco para secar de forma eficiente la biomasa con ese flujo masico de entrada.



Por otro lado, si el flujo masico disminuye provoca que la velocidad también disminuya. Por ejemplo, en la Fig. 3-21.c,  $W_{bh\_e}[1]=0.01$  y en el tiempo 342432[s] aprox. sería la salida del secador. Como es de esperar se logra se buena manera disminuir la humedad para esa cantidad de biomasa, incluso llegando a niveles más bajos, además las secciones  $X_s[9]$  y  $X_s[10]$  están cercanas por lo que se está cerca de la humedad mínima a la que se puede llegar bajo esas condiciones. La Fig. 3-21.a es con flujo  $W_{bh\_e}[1] = 0.0125$  (de agrego de forma comparativa)



**Fig. 3-19 “Humedad de la biomada ante variaciones del flujo masico de biomasa de entrada”**

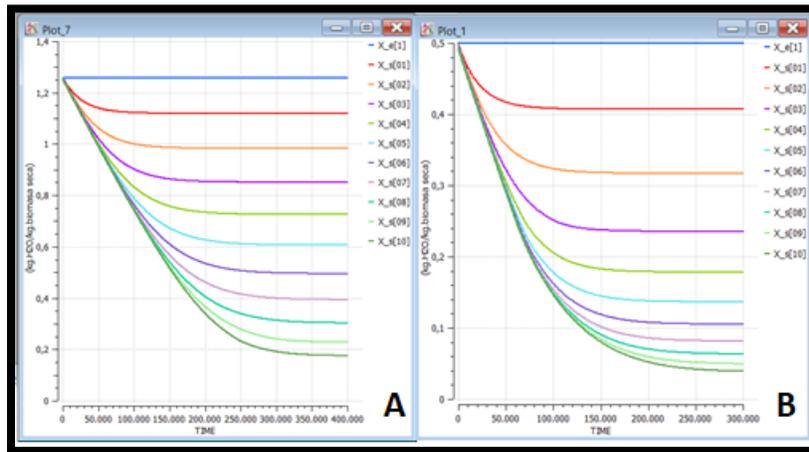
### 3.4.1.4 Humedad de la biomasa de entrada

Este es otro parámetro importante, ya que si tiene un valor más bajo también se logrará niveles de humedad menores, lo que da la opción de aumentar el  $W_{bh\_e}[1]$  así secar más biomasa en el mismo tiempo.

Como se ve en la Fig. 3-22.b con una humedad total  $X_e[1] = 0.5$  y con el mismo flujo masico de biomasa húmeda  $W_{bh\_e}[1] = 0.0125$  [Kg/s] se alcanzan niveles de humedad más bajos que anteriormente y además las curvas de las etapas  $X_s[9]$  y  $X_s[10]$  están ya cercanas entre

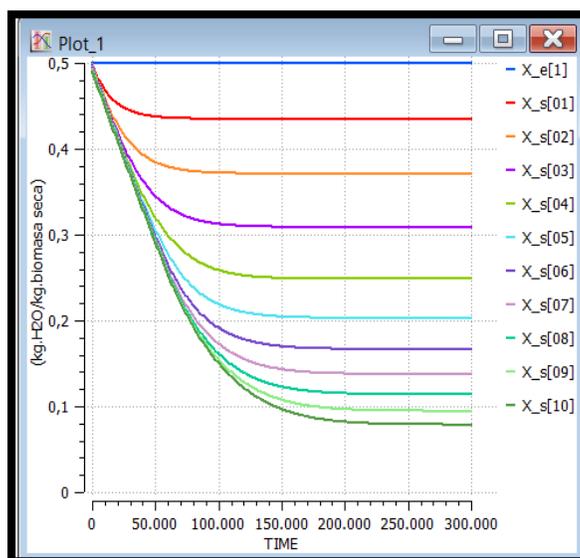


si al nivel de humedad donde se estabilizan. La Fig. 3-22.a corresponde a la respuesta con  $X_{e[1]}=1.26$ .



**Fig. 3-20 “Humedad de la biomasa de salida ante disminuciones de la humedad de entrada”**

Ahora, tomando la opción de secar más biomasa en el mismo tiempo, en la Fig. 3-23 se procedió a aumentar el flujo masico de biomasa de entrada en un 44%, lo que es equivalente a  $W_{bh} = 0.018$  [Kg/s] y aun así se alcanzan niveles de humedad más bajos para el tiempo 190.240 [s], para el cual estaría ahora la salida del secador. Con estos parámetros de entrada ya se podría tener un flujo masico de biomasa de salida  $W_{bh\_s[10]} = 0.0128$ [Kg/s], lo que equivale a 46.1 [Kg/h]



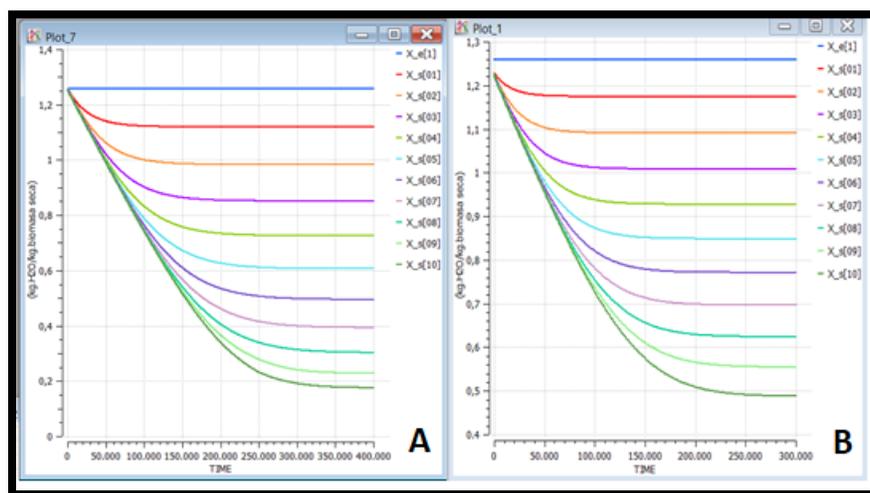
**Fig. 3-21 Humedad de salida ante disminucion de  $X_e[1]$  y aumento de  $Wbh_e[1]$**

### 3.4.1.5 Altura del manto de biomasa

La altura del manto de biomasa varía el área de transferencia, es por esto por lo que se disminuyó de un manto de 0.25[m] a 0.15[m] para hacer el análisis con un área de transferencia menor. Para conseguir el mismo flujo masico de entrada  $Wbh_e[1]=0.0125[\text{kg/s}]$  ahora se necesita más velocidad ( $V_{\text{cinta}} = 7.3007 \cdot 10^{-5}$ ), lo que implica que ahora la salida del secador está en el tiempo 164.000[s]. Como se ve en la Fig. 3-24.b en las etapas  $X_s[9]$  y  $X_s[10]$  estas llegan a niveles de humedad muy altos y no están cercanas entre sí, lo que implica que falta por secar para llegar a la menor humedad posible. La Fig. 3-24.a es con la altura del manto de 0.25[m]

Por otro lado viendo el tiempo en que se estabiliza y proyectando futuras curvas con  $n > 10$ , el largo del secador pareciera ser muy poco para el  $Wbh_e[1]$  y la velocidad de la cinta.

Para ajustar es necesario disminuir  $Wbh_e[1]$ , pero esto significa que tendremos menos biomasa a la salida en la etapa 10.



**Fig. 3-22 “Humedad de la biomasa ante disminución de la altura del manto de biomasa”**

### 3.4.2 Análisis dinámico de la planta

En esta sección del trabajo se buscó estudiar el comportamiento del modelo ante variaciones de las entradas con respecto al tiempo. De esta forma se logra apreciar los efectos de las posibles variables de control y las perturbadoras en la humedad de salida de la biomasa. Para realizar esto, se hizo variar solo una entrada a la vez, dejando constante las demás.

Las variaciones de la humedad se comportan similar a un modelo de primer orden, debido a esto por lo que en cada una de las secciones se realizó una aproximación a través de un modelo PORT y se muestra el desempeño ante las mismas variaciones que se sometió el modelo real.

#### 3.4.2.1 Temperatura del gas de secado

La temperatura de entrada se varió de 80°C a 40°C en el tiempo 350000[s] en donde la respuesta ya se había estabilizado y luego en el tiempo 850000[s] donde ya se veía una respuesta estable nuevamente. La temperatura de entrada se varió de 80°C a 40°C en el

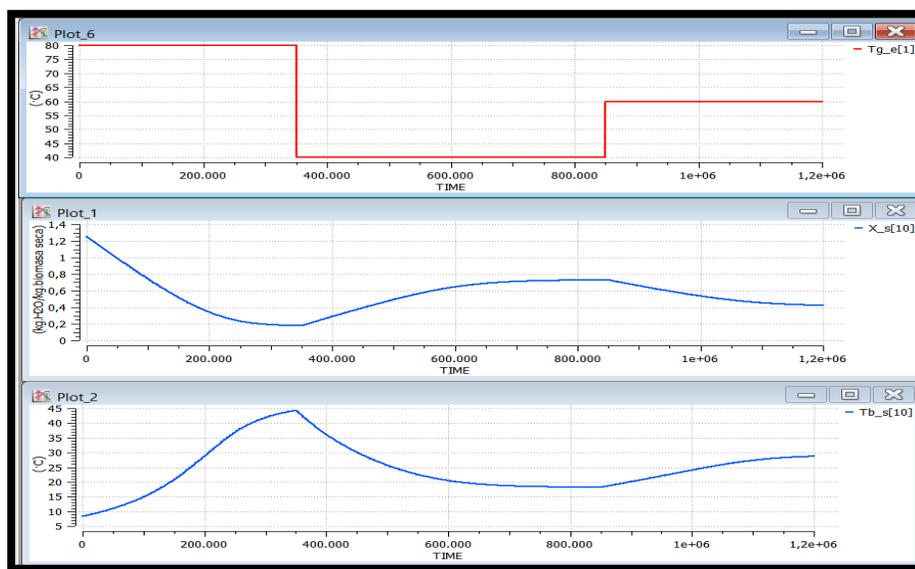


tiempo 350.000[s] en donde la respuesta ya se había estabilizado y luego en el tiempo 850.000[s] donde ya se veía una respuesta estable nuevamente.

En la Ec. N°35 se muestra la entrada utilizada para este experimento.

$$Tg\_e[1] = 80 - 40 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 350000) + 20 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 850000) \quad (35)$$

La humedad de la biomasa aumenta considerablemente con el primer cambio en la temperatura a los 350.000[s], pasando de estar en 0.17 [Kg agua/Kg biomasa seca] a 0.73[Kg agua/Kg biomasa seca]. Posteriormente con el aumento vuelve a disminuir, llegando a 0.4 [Kg agua/Kg biomasa seca]. Todo lo anterior se puede ver en la Fig. 3-25 donde se muestra también lo sucedido con la temperatura de la biomasa, obviamente en esa grafica al ser la temperatura del gas de secado más alta, también lo será la biomasa se salida.



**Fig. 3-23 “Respuesta dinamica ante variaciones en Tg\_e[1]”**

En la Ec. N°36 se muestra el modelo de 1° orden obtenido por la aproximación del modelo PORT y posteriormente en la Fig. 3-26 se muestra el desempeño del modelo para las variaciones de la temperatura del gas de secado desde los 350000[s] y estando previamente



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



ya estabilizado en la humedad 0.17[Kg agua /Kg biomasa seca]. Como se ve allí las variaciones de la humedad responden muy similar a las del modelo real lo que indica que es una buena aproximación.

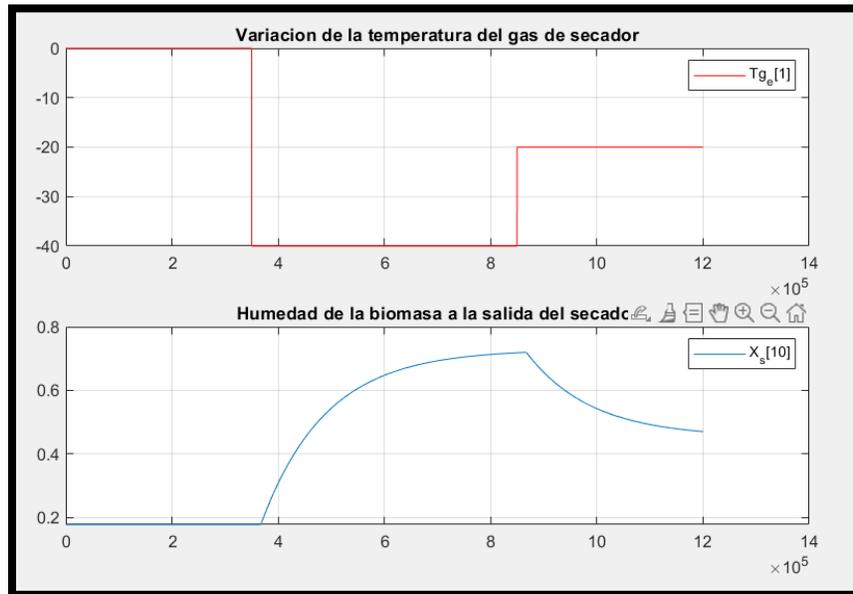
$$\frac{X_{s[10]}(s)}{Tg_{e[1]}(s)} = -\frac{0.01376}{121600 \cdot s + 1} \cdot e^{-17200 \cdot s} \quad (36)$$

Del modelo PORT se puede extraer la siguiente información:

$$K = -0.01376$$

$$T = 121.600$$

$$L = 17.200$$



**Fig. 3-24 Respuesta del modelo PORT ante variaciones de  $Tg_e[1]$**

Siendo  $K$  la ganancia del modelo ante variaciones de la temperatura del gas de secado,  $L$  es el retardo del modelo ante una variación (tiempo que demora en responder) y por último  $T$  es la constante de tiempo del modelo, lo que me permite conocer el tiempo de establecimiento de la forma  $T_s = L+4T = 503.600[s]$ .

Las simulaciones de este modelo PORT y los que se verán a continuación se realizaron en MATLAB. La programación se puede ver en el Anexo N°6.

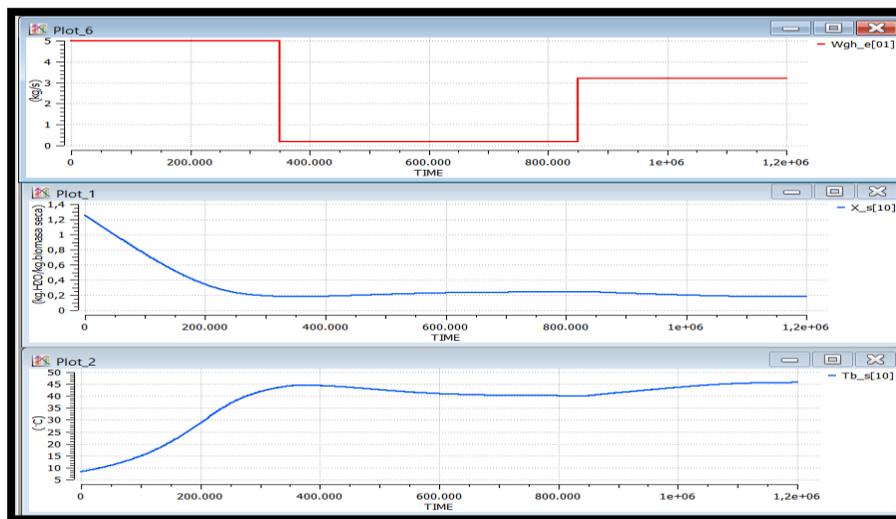
### 3.4.2.2 Flujo masico de gas de secado

Las variaciones del flujo masico de gas de secado se muestran en la Ec. N°37. Este parte de  $5[Kg/s]$ , luego disminuye a  $0.2[Kg/s]$  y por último se vuelve aumentar a  $3.2[Kg/s]$ .



$$Wgh\_e [1] = 5 - 4.8 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 350000) + 3 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 850000) \quad (37)$$

Como se ve en la siguiente figura las variaciones del flujo masico de gas no provocaron cambios significativos en la humedad de salida, con la primera variación paso de 0.15 [Kg agua /Kg biomasa seca] a 0.24 [Kg agua /Kg biomasa seca]. Ya con la segunda variación llego a 0.18 [Kg agua /Kg biomasa seca].



**Fig. 3-25 Respuesta dinamica ante variaciones de Wgh\_e[1]**

La aproximación del modelo por se muestra en la Ec. N°38. y posteriormente se muestra la respectiva respuesta del modelo ante una simulación con las mismas variaciones mostradas anteriormente. La información que se puede obtener del modelo se muestra a continuación:

$$K = -0.01331$$

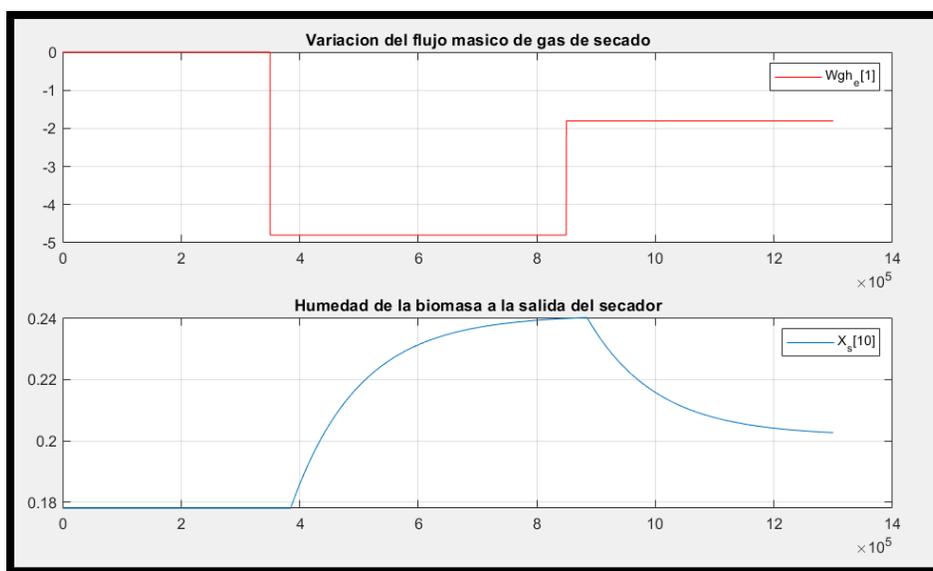
$$L = 34.800$$

$$T = 115.000$$



$$T_s = 4 \cdot T + L = 494.610$$

$$\frac{X_s[10](s)}{Wgh_e[1](s)} = -\frac{0.01331}{115000 \cdot s + 1} \cdot e^{-34800 \cdot s} \quad (38)$$



**Fig. 3-26 “Respuesta del modelo PORT para variaciones de Wgh\_e[1]”**

### 3.4.2.3 Humedad de entrada de la biomasa

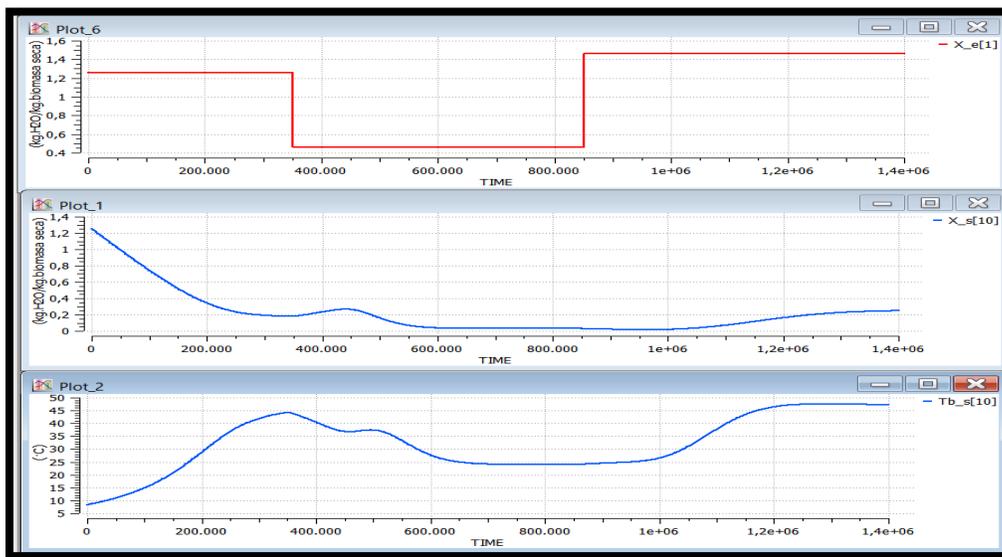
Estas variaciones más que ser una posible variable para controlar, se trata de una perturbación para el modelo, de igual forma se incluye para analizar su influencia de forma dinámica.

Las variaciones para esta entrada y los tiempos en los cuales se realizaron se muestran en la Ec. N°39, comenzando desde 1.26 [Kg agua / Kg biomasa seca] a 0.46 [Kg agua / Kg biomasa seca] y posteriormente a 1.46 [Kg agua / Kg biomasa seca].



$$X_e[1] = 1.26 - 0.8 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 350000) + 1 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 850000) \quad (39)$$

Como es de esperar una disminución en la humedad de entrada provoca una disminución en la humedad de salida y viceversa con el aumento posterior.



**Fig. 3-27 Respuesta dinamica ante variaciones de  $X_e[1]$**

El modelo PORT y su respuesta ante estas variaciones se muestran a continuación.

$$K = 0.1829$$

$$L = 145.000$$

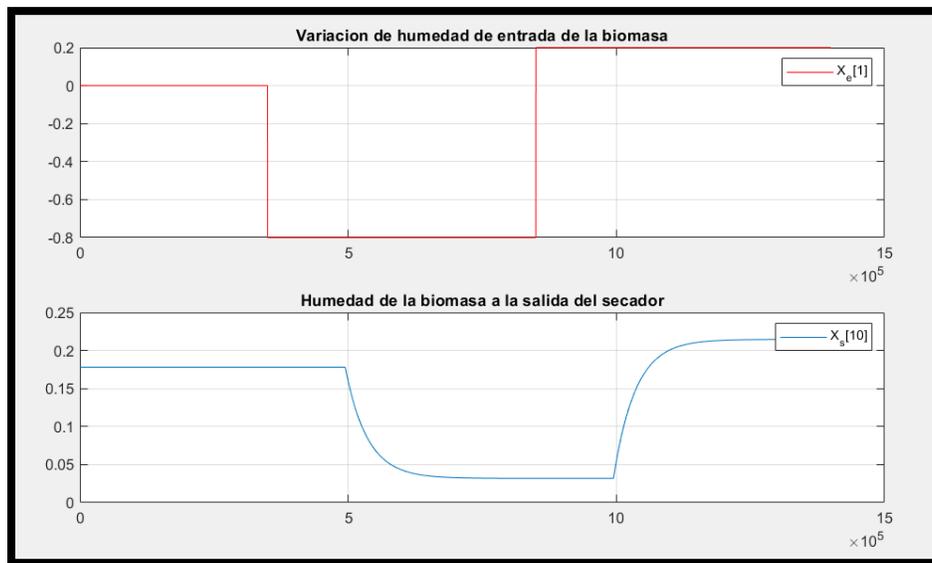
$$T = 40.880$$

$$T_s = 4 \cdot T + L = 308.140$$



$$\frac{X_{-s}[10](s)}{X_{-e}[1](s)} = \frac{0.1829}{40880 \cdot s + 1} \cdot e^{-145000 \cdot s} \quad (40)$$

Notar que tiene un tiempo de establecimiento menor a los modelos anteriores, lo que se ve reflejado de forma gráfica en la respuesta en la Fig. 3-30.



**Fig. 3-28 “Respuesta del modelo PORT para variaciones de X\_e[1]”**

#### 3.4.2.4 Temperatura de la biomasa de entrada

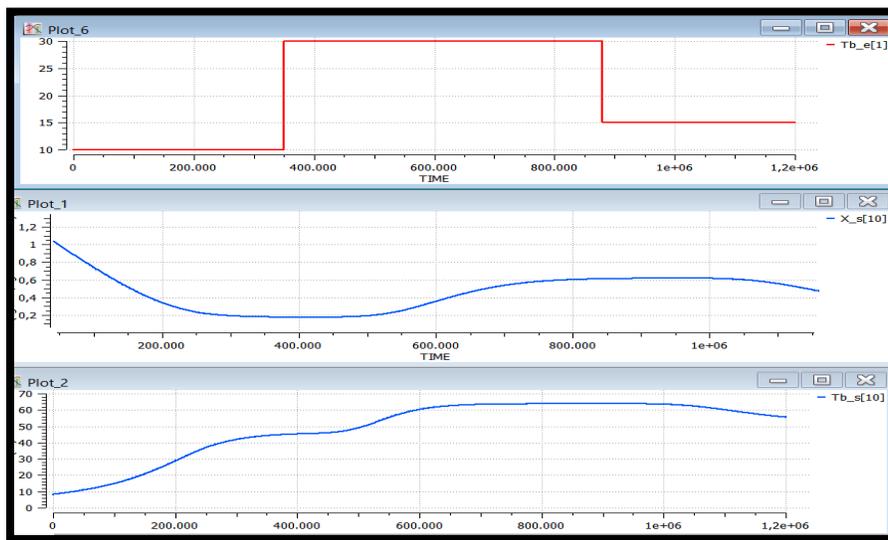
Por último, esta variable la cual también puede ser una perturbación se analiza con la entrada que se muestra a continuación, donde se varió su temperatura desde 10°C a 30°C a los 350.000[s] y luego a los 15°C a los 880.000[s].

La humedad de la biomasa aumenta ante el aumento de la temperatura de entrada de esta. Esto es porque la transferencia de calor desde el gas a la biomasa es proporcional a la



diferencia de temperatura de ambas, provocando así que disminuya el flujo de evaporación desde la biomasa al gas y por ende el proceso de secado sea más lento

$$Tb\_e[1] = 10 + 20 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 350000) - 15 \cdot \text{step}(\text{TIME}, 880000) \quad (41)$$



**Fig. 3-29 Respuesta dinamica ante variaciones de  $Tb\_e[1]$**

El modelo estimado se muestra en la Ec. N°42. y posteriormente en la Fig. 3-32 la respuesta de este ante las variaciones de la entrada ya mencionadas. Observar que el tiempo de establecimiento es el más lento entre los modelos presentados.

$$K = 0.02196$$

$$L = 191.100$$

$$T = 106.900$$

$$Ts = 4T + L = 618.020[s]$$



$$\frac{X_{s[10]}(s)}{Tb_{e[1]}(s)} = \frac{0.02196}{106900 \cdot s + 1} \cdot e^{-191000 \cdot s} \quad (42)$$

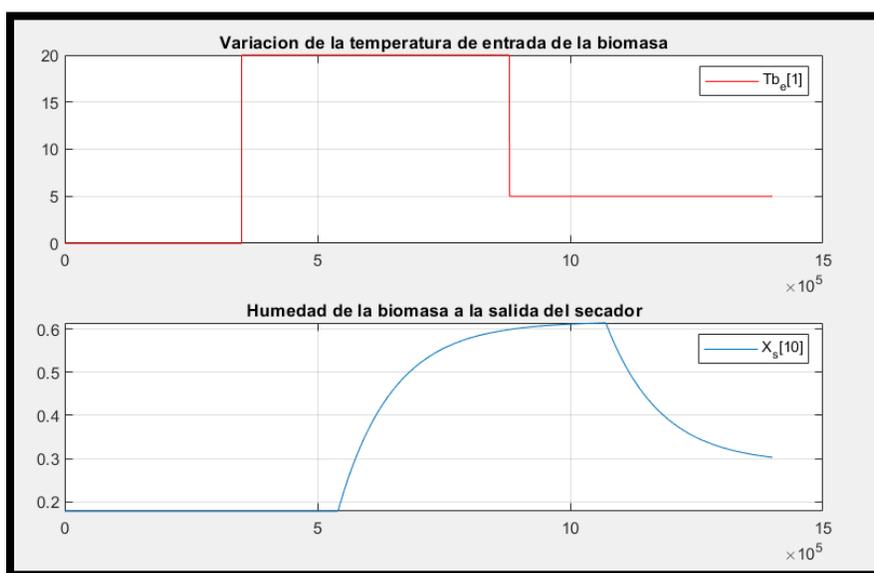
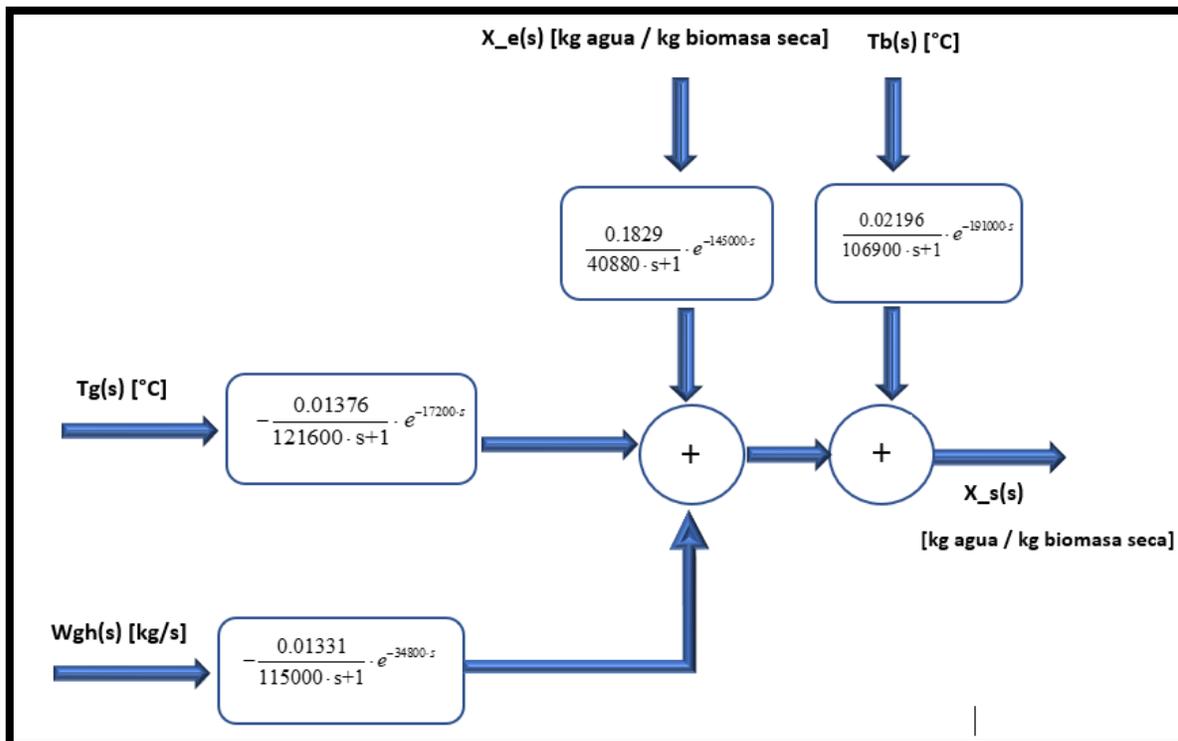


Fig. 3-30 “Respuesta del modelo PORT para variaciones de Tb\_e[1]”

Tabla 3.3 Comparación de parámetros de modelo PORT

| Parámetros PORT                | Variación |          |         |         |
|--------------------------------|-----------|----------|---------|---------|
|                                | Tg_e[1]   | Wgh_e[1] | X_e[1]  | Tb_e[1] |
| K (Ganancia)                   | -0.01376  | -0.01331 | 0.1829  | 0.02196 |
| L (Retardo)                    | 17.200    | 34.800   | 145.000 | 191.100 |
| T (Constante de tiempo)        | 121.600   | 115.000  | 40.880  | 106.900 |
| Ts (Tiempo de establecimiento) | 503.600   | 494.610  | 308.140 | 618.020 |



**Fig 3-31 Diagrama en bloque del modelo**

En la Fig. 3-33 se muestra en forma de diagrama de bloque la representación del lazo de control para el secador de biomasa, en donde la temperatura y el flujo masico de gas de secado son las posibles variables de control para el proceso. Por otro lado, se consideran como perturbaciones la temperatura y la humedad de la biomasa de entrada, al ser variables que dependen de las condiciones externas.



## 4 POSIBLES ESTRATEGIAS DE CONTROL A UTILIZAR

Tras obtener los resultados gráficos del modelo en parámetros distribuidos y no la función de transferencia del proceso, queda la incertidumbre de cómo controlar dicha cámara de secado para diferentes humedades que posea la biomasa a la entrada. Para lo anterior se sugiere realizar un prototipo de la planta permitiendo realizar el proceso de identificación de la planta a través de técnicas que se estudian en el curso de “Identificación de sistemas” permitiendo conocer la función de transferencia de dicho modelo, la cual sin duda presentará un tiempo muerto (retardo) lo cual sin duda habrá que considerar al momento de seleccionar la técnica de control.

Para tratar el problema de los retardos sobre los sistemas de control en lazo cerrado existen dos grandes líneas de investigación las cuales son:

- Controladores con compensadores de tiempo muerto
- Control Predictivo

### 4.1 Técnicas de control utilizadas

El control de los diferentes tipos de secadores que existen actualmente se lleva a cabo mediante diferentes técnicas que se pueden observar en investigaciones, sin embargo, en las investigaciones solo hacen alusión al secado de diferentes productos, pero no al secado de biomasa forestal.

El control Smith o predictor de Smith resuelve uno de los principales problemas de los controladores clásicos como es el PID, en donde la planta presenta retardo, cuyo origen se puede deber a diferentes causas, entre las cuales destacan: Distancia físicas entre el controlador y el instrumento de medición; tiempo requerido por los actuadores para ejecutar algún cambio; por ejemplo compuertas; comportamiento intrínseco donde el gran tiempo que



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



se requiere para que ocurra una reacción química; tiempo necesario para la transmisión de datos en redes de comunicación.

El retardo de tiempo puede ser dominante o no dominante, lo cual está relacionado según la relación  $\tau/T$ . Si el valor de la relación es mayor a 1 donde  $\tau$  es el retardo de tiempo y  $T$  es la mayor constante de tiempo de la planta, el retardo se clasifica como dominante. Esta característica se presenta en las funciones de transferencia de plantas con transporte, transferencia de masa/energía (secadores, intercambiadores, etc.). El diseño de controladores para este tipo de procesos requiere de un gran trabajo, principalmente porque las perturbaciones no se detectan a tiempo y la acción de control actúa de forma “atrasada”. Un ejemplo de esta situación se presenta en el estudio realizado por Omar Castro [25] en el que realizan el análisis dinámico en parámetros distribuidos. La modelación la realizan a través de ecuaciones de Saint-Venant las cuales las clasifican de engorrosas y complejas y extremadamente difíciles de implementar en la teoría de control, por lo cual a través del prototipo existente ajustan un modelo de primer orden con retardo linealizado en puntos de operación, para luego utilizar la técnica de Smith.

Pablo Parra Rosero y su grupo de trabajo aplicó un controlador no lineal predictivo y adaptativo (NEPSAC) a un proceso de secado de granos de cacao del cual ya contaban con una planta piloto, para compararlo con el Control Generalizado de Modelos (GPC) y el Control PID [12]. Como resultado obtuvieron que el efecto anticipatorio conseguido da un mejor resultado que otros controladores (PID Y GPC). El control predictivo basado en modelo se ha vuelto popular en muchos procesos porque puede manejar sistemas grandes y multivariados sometidos a restricciones duras en los estados y entradas. Además, este control permite considerar la parte económica en la denominada función de costo.

Jayro Paiva y Juan Soto en su trabajo “Control y supervisión en línea de un secador para el proceso industrial de la harina de pescado”, diseñan un controlador PI a través de la identificación de la planta con el identificador de sistemas de MATLAB, obteniendo un sistema de primer orden. Finalmente, lograron un buen rendimiento del sistema de control.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



En [18] los autores presentan un control difuso para un secador híbrido solar para el secador de ají. El objetivo de la estrategia de control era mantener la temperatura por sobre la temperatura mínima necesaria para realizar la evaporación y disminución del porcentaje de humedad. Para lograr diseñar el control difuso fue necesario estudiar cómo era el comportamiento de la salida en relación con los cambios de las entradas.

En [19] se utilizó una versión mejorada del control PID clásico para el proceso de secado de grano. Con ayuda de un algoritmo genético fue posible encontrar mejores parámetros para el control y así conseguir un control óptimo. Se mejoró el tiempo de estabilización ( $t_s$ ) y disminución del sobrepaso en comparación el control PID y el PID difuso, además de mejorar la robustez del control. Este control es ideal para procesos complejos y con cierta incertidumbre.

Como se puede observar diferentes pueden ser las formas de controlar un secador orientadas a controlar por primera vez un secador o mejorar el sistema aplicando otro tipo de control, sin embargo, en la gran parte de la documentación encontrada están aplicadas al secado de materiales diferentes de la biomasa forestal y a secadores de tipo rotatorios, es por esto por lo que se hace necesario comenzar con el modelamiento dinámico del proceso para luego poder aplicar las técnicas de control [24].



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 5 CONCLUSIÓN

Tras el análisis bibliográfico se logra desarrollar el modelo paramétrico, el cual permite representar la dinámica del proceso de secado de biomasa, considerando la evolución de las variables del proceso. Lo anterior permite conocer como influyen los diversos parámetros en dicha dinámica.

Se logró demostrar a través de simulaciones que hay varios parámetros de entrada que son muy importantes y marcan la diferencia dentro del proceso de secado en cuanto a tiempo y porcentaje de humedad de salida de la biomasa.

En esta investigación se busca encontrar los mejores parámetros para obtener el mayor flujo masico de biomasa de salida para la etapa n°10, sin dejar de lado los requerimientos de la empresa BETECH, quien sugerían un porcentaje de humedad entre los 18% y 13% en base seca. Si bien hubo algunas limitaciones para algunas simulaciones que necesitaban un  $n > 10$  para analizar de forma más certera la respuesta del modelo, con la flexibilidad y simplicidad dada por el Software Ecosimpro se lograron establecer los parámetros mostrados en los resultados con los cuales se obtuvo una buena respuesta en cuanto a porcentaje de humedad de la biomasa de salida y flujo masico de salida.

Dentro de los parámetros de entrada que pueden mejorar aún más los resultados, sugerimos disminuir la humedad de la biomasa con algún proceso previo de secado natural o artificial, así hacer más eficiente el posterior secado en la cámara en cuanto a porcentaje humedad de la biomasa y de la cantidad en Kg/s. Además del ahorro energético que se podría lograr dado que sería menos los requerimientos de los demás parámetros para obtener un buen resultado.

Para una posterior investigación y dado que le empresa planea hacer una planta secadora a escala, se podría hacer un estudio más fundamentado. Hacer ajustes al modelo ya que hay constantes utilizadas que fueron obtenidas de bibliografía, pero como sabemos estos se deben calcular de forma experimental ya que pueden hacer cambios evidentes en los resultados.

*Alejandro Ramirez, Juan Tapia*



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Entre estos parámetros se encuentran los coeficientes de transferencia de calor para la biomasa seca y biomasa húmeda y también coeficiente de difusión

El análisis dinámico realizado en la sección 4.4.2 entregó como resultado los parámetros para los modelos PORT según corresponda. Según estos valores podemos concluir que el sistema ante una variación de la temperatura del gas reaccionara de forma más rápida que ante una variación de los demás parámetros de entrada y con un mayor efecto sobre la humedad de salida. Las variaciones de la temperatura de la biomasa y humedad de entrada (ambas perturbaciones) presentan una alta incidencia en la variable de salida, por lo cual habrá que tenerla en consideración al igual que el retardo para asignar una correcta estrategia de control.

---

*Según William L. Luyben , “el resultado más importante del desarrollo de un modelo matemático es la comprensión que se alcanza sobre lo que realmente hace el proceso, la visión alcanzada permite alejar los factores de confusión extraños y llegar a la esencia del sistema percibiendo claramente las relaciones causa efecto de las distintas”*

**Alejandro Ramirez, Juan Tapia**



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 6 ANEXOS

### 6.1 Anexo N°1 “Cálculos de algunos parámetros del modelo”

Al ser un secador de cinta, existe una relación lineal entre el flujo masico de biomasa seca y la velocidad de la cinta.

Hay que recordar que la cantidad de biomasa seca no varía, solo varia el agua contenida en ella, es decir la cantidad de biomasa húmeda

El manto de biomasa se mantiene constante, siendo las dimensiones de este las siguientes:

$$a = 1.23[m]$$

$$h=0.25[m]$$

$$area = 0.3075[m^2]$$

Donde a es el ancho del manto de biomasa y h la altura de este.

Se considera para el área de transferencia que la porosidad del lecho  $e_b = 0.697$ , obteniendo así:

$$area\_transferencia = 0.0307 * 0.697[m^2]$$

$$area\_transferencia = 0.214[m^2]$$

Considerando también que la densidad de la biomasa es  $928 \frac{Kg}{m^3}$  y que el flujo masico de

biomasa humedad es  $0.0125 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$  se puede obtener el flujo volumétrico de biomasa húmeda



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$Wbh = Fbh \cdot Densidad$$

$$Fbh = \frac{Wbh}{Densidad}$$

$$Fbh = \frac{0.0125}{928} = 1.347 \cdot 10^{-5}$$

Conociendo el flujo volumétrico de biomasa humedad y el área, se puede obtener la velocidad de la cinta

$$Fbh = Area \cdot V_{cinta}$$

$$V_{cinta} = \frac{Fbh}{Area}$$

$$V_{cinta} = \frac{1.347 \cdot 10^{-5}}{0.307} = 4.3876 \cdot 10^{-5}$$

Teniendo la siguiente relación (con la constante  $K_w = 1$ ) se puede obtener los Kg de biomasa húmeda en la etapa inicial:

$$Wbh = K_w \cdot mbh \cdot V_{cinta}$$

$$mbh = \frac{Wbh}{V_{cinta}}$$

$$mbh = \frac{Wbh}{V_{cinta}} = \frac{0.0125}{4.38 \cdot 10^{-5}} = 285.36 [Kg]$$

Y ahora para obtener los Kg de biomasa seca se tiene:

$$mbh = mb \cdot (1 + X)$$

$$mb = \frac{mbh}{(1 + X)} = \frac{285.36}{1 + 1.26} = 126.26 [Kg]$$



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



De la relación anterior nos podemos dar cuenta que los kg de biomasa humedad irán disminuyendo a medida que la humedad disminuya, es decir disminuye la cantidad de agua presente en la biomasa

En cambio, el valor de los Kg de biomasa seca no cambia a medida que avanzan dentro del secador, estos serán constante al ser los flujos masico de biomasa constante durante todo el proceso de secado (como se puede ver en la siguiente expresión).

Ahora también se puede obtener el valor del flujo masico de biomasa seca:

$$Wb = Kw \cdot mb \cdot V_{cinta}$$

$$Wb = 1 \cdot 126.26 \cdot 3.5101 \cdot 10^{-5}$$

$$Wb = 0.0055 \left[ \frac{\text{Kg}}{s} \right]$$

Esta forma de obtener el flujo de biomasa seca es un poco engorrosa, pero permite entender mejor las relaciones que hay dentro del proceso.

Otra forma más fácil es dividir el flujo masico de biomasa humedad por (1+X), de la siguiente forma:

$$Wb = \frac{Wbh}{1+X}$$

$$Wb = \frac{0.0125}{1+1.26}$$

$$Wb = 0.0055 \left[ \frac{\text{Kg}}{s} \right]$$

Al ser la altura del manto de biomasa constante, el flujo masico de biomasa seca será dependiente solamente de la velocidad de la cinta, de esta forma buscaremos el manto de biomasa con el que tengamos los mejores resultados y luego sabremos la velocidad necesaria de la cinta para que este sea constante haciendo uso de la relación ya usada:



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$Wb = Kw \cdot mb \cdot V_{cinta}$$

$$V_{cinta} = \frac{Wb}{mb}$$

Para el gas se puede realizar lo mismo, de esta forma podemos conocer la masa de gas seca en cada etapa, para esto es necesario conocer la dimensión del container.

$$a = 2.43[m]$$

$$h = 2.59[m]$$

$$area = 6.29[m^2]$$

Conociendo la densidad del aire húmedo en relación con su temperatura y humedad, valor que se puede obtener de la carta psicométrica o ecuaciones basadas en ella, se tiene:

$$Densidad = 0.95 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$Wgh = 5 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

$$Fgh = \frac{Wgh}{Densidad} = \frac{5}{0.951} = 5.25 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Vg = \frac{Fgh}{area} = \frac{5.25}{6.29} = 0.83 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

La densidad fue calculada a través de la carta psicométrica, considerando una humedad relativa del 43% y temperatura en bulbo seco de 75°C, datos que serán utilizados en la simulación.

Es decir, conociendo la densidad y el flujo masico de gas húmedo, se puede conocer el valor del flujo volumétrico de gas y la velocidad de este.

Para conocer el flujo masico de gas seco se utiliza la ecuación:



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$W_g = \frac{W_{gh}}{1+Y}$$

$$W_g = \frac{5}{1+0.12} = 4.46 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

Y por último para conocer la masa de gas seco para las etapas, se tiene:

$$W_g = Kw_2 \cdot mg \cdot V_g$$

$$mg = \frac{W_g}{V_g}$$

$$mg = \frac{4.46}{0.83} = 5.37 [Kg]$$

Donde  $Kw_2$  es la constante de ajuste, que se dará valor 1, dejando el flujo masico de gas solamente dependiente de la velocidad de este.



## 6.2 Anexo N°2 “Carta Psicométrica”

La carta psicométrica muestra de forma gráfica los valores de las propiedades para el aire húmedo, en este caso a temperaturas “normales”. Definiendo dos propiedades del aire podemos determinar los otros parámetros:

- Volumen
- Humedad específica
- Temperatura Bulbo húmedo
- Temperatura Bulbo seco
- Entalpía

En el caso nuestro necesitamos utilizar esta carta psicométrica para obtener los parámetros de entrada del aire de secado, obtenido los siguientes resultados.

| Temperatura BS [C] | Humedad E. [kg A /kg A.S] | Densidad [kg/m3] | Entalpía [kJ /kg A.S] |
|--------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|
| 80                 | 0.121                     | 0.94             | 402.7                 |

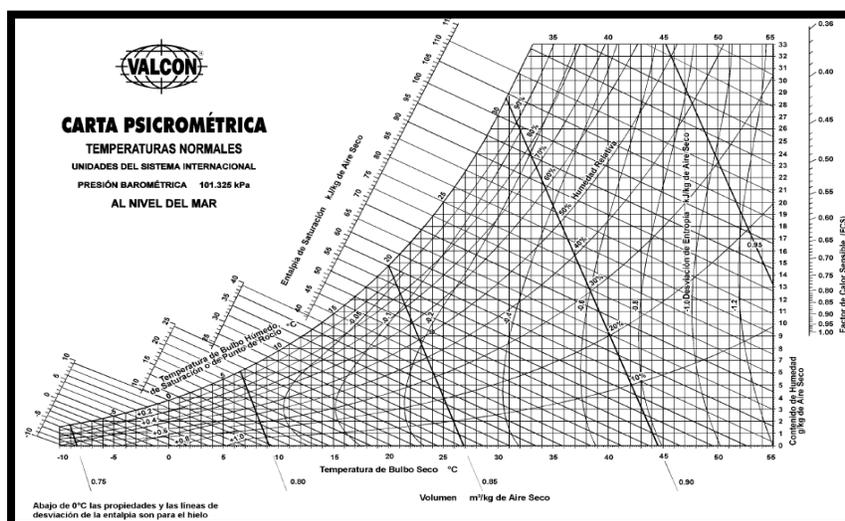


Fig. 6-1 Carta Psicometrica



### 6.3 Anexo N°3 Reescritura de balances energéticos

Se realizo el siguiente trabajo algebraico a los balances energéticos para llevar estas ecuaciones a una forma menos compleja de visualizar y compatible con el software (estas son las ecuaciones que se programaron en el Ecosimpro).

#### 6.3.1 Balance de energía para biomasa húmeda

$$\begin{aligned} \frac{d(mb_j \cdot Hbh_{s,j})}{dt} &= Wb_{s,j-1} \cdot (1 + X_{s,j-1}) \cdot Hbh_{s,j-1} - Wb_{s,j} \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{d(mb_j(1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j})}{dt} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{d(mb_j \cdot Hbh_{s,j} + X_{s,j} \cdot mb_j \cdot Hbh_{s,j})}{dt} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{mb_j \cdot d(Hbh_{s,j})}{dt} + \frac{mb_j \cdot d(X_{s,j} \cdot Hbh_{s,j})}{dt} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mb_j \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot X_{s,j} \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + \frac{d(X_{s,j})}{dt} \cdot Hbh_{s,j} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mb_j \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot X_{s,j} \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt} \cdot Hbh_{s,j} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt} \cdot Hbh_{s,j} &= Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt} \cdot Hbh_{s,j} - Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e + Wb_e \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Hbh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \\ mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt} \cdot Hbh_{s,j} - Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e + Wb_e \cdot Hbh_{s,j} + Wb_e \cdot X_{s,j} \cdot Hbh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \\ mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} + (Wb_e + Wb_e \cdot X_{s,j} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt}) \cdot Hbh_{s,j} - Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \\ (Wb_e + Wb_e \cdot X_{s,j} + mb_j \cdot \frac{d(X_{s,j})}{dt}) \cdot Hbh_{s,j} - Wb_e \cdot (1 + X_e) \cdot Hbh_e + mb_j \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot \frac{d(Hbh_{s,j})}{dt} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \end{aligned}$$



### 6.3.2 Balance de energía del gas humedo

$$\begin{aligned} \frac{d(mgh_j \cdot Hgh_{s,j})}{dt} &= Wg_{s,j-1} \cdot (1+Y_{s,j-1}) \cdot Hgh_{s,j-1} - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{d(mg_j(1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j})}{dt} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{d(mg_j \cdot Hgh_{s,j} + Y_{s,j} \cdot mg_j \cdot Hgh_{s,j})}{dt} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ \frac{mg_j \cdot d(Hgh_{s,j})}{dt} + \frac{mg_j \cdot d(Y_{s,j} \cdot Hgh_{s,j})}{dt} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mg_j \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot Y_{s,j} \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mg_j \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot Y_{s,j} \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mg_j \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mg_j \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} - Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e + Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \\ mg_j \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} - Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e + Wg_{s,j} \cdot Hgh_{s,j} + Wg_{s,j} \cdot Y_{s,j} \cdot Hgh_{s,j} + Q_j - Wevap_j(\lambda + Hag) &= 0 \\ mg_j \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} + (Wg_{s,j} + Wg_{s,j} \cdot Y_{s,j} + mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt}) \cdot Hgh_{s,j} &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \\ mg_j \cdot \frac{d(Y_{s,j})}{dt} \cdot Hgh_{s,j} + mg_j \cdot \frac{d(Hgh_{s,j})}{dt} (1+Y_{s,j}) &= Wg_e \cdot (1+Y_e) \cdot Hgh_e - Wg_{s,j} \cdot (1+Y_{s,j}) \cdot Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j(\lambda + Hag) \end{aligned}$$



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 6.4 Anexo N°4 “Código principal Ecosimpro”

/\*-----

LIBRARY: CONTROL\_EXAMPLES\_BOOK

FILE: prueba

CREATION DATE: 17/03/2022

-----\*/

USE CONTROL

USE PORTS\_LIB

USE MATH

-----

COMPONENT Prueba (INTEGER m=10)

-----

DATA

/\*DATOS COMO CONSTANTES, QUE TENDRA UN VALOR FIJADO ANTES DE EMPEZAR LA SIMULACION\*/

REAL Xc=0.10 "Humedad Crítica (kg agua/kg sol.seco)"

REAL dc= 928.2 "densidad de la biomasa (kg/m3)"

REAL dg=0.924 "densidad del gas (kg/m3)"

REAL Kw=1.0 "constante rel flujo másico biomasa-velocidad (m-1)"

REAL KD=0.006 "constante de difusión (kg agua/s)"

//REAL Ak=0.0308 //0.1414 "área de transferencia de calor gas-biomasa (m2)"

REAL hb1=0.12 "coeficiente de transmisión de calor gas-biomasa húmeda"

REAL hb2=0.01 "coeficiente de transmisión de calor gas-biomasa seca"

REAL L=12 "longitud del container (m)"

REAL cl=2260 "calor latente de evaporación del agua (kJ/kg)"



**UNIVERSIDAD DEL BIO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



REAL Cpa=4.1844 "Calor específico del agua (kJ/kg·C)"  
 REAL Cpm = 2.5 "Calor específico de madera(kJ/kg·C)"  
 //REAL Vb = 0.0004 "Velocidad de la biomasa" // velocidad de la cinta  
 REAL Pat=100000 "Presión atmosférica (Pa)"  
 REAL pmg=29 "Peso molecular del gas de secado (kg/kmol)"  
 REAL R=8.314 "constante de los gases ideales (kJ/kmol\*C)"  
 REAL db=928

-----  
 DECLS

/\*CONTIENE VARIABLES DINAMICAS QUE ECOSIMPRO TENDRA QUE CALCULAR A NO SER QUE SEAN VARIABLES DE CONTORNO QUE EL USUARIO TENDRÁ QUE ESECIFICAR.\*/  
 ESECIFICAR.\*

REAL Ak  
 REAL Tb\_e[1]  
 REAL mb[m] "masa de biomasa (kg)"  
 REAL Wb\_e[1] "flujo másico de biomasa a la entrada (kg/s)"  
 REAL Wb\_s[m] "flujo másico de biomasa a la salida (kg/s)"  
 REAL Wg\_e[1] "flujo másico de gas a la entrada (kg/s)"  
 REAL Wg\_s[m] "flujo másico de gas a la salida (kg/s)"  
 REAL Fg[m] "flujo volumétrico de gas húmedo (m3/s)"  
 REAL Wbh\_e[m] "flujo másico de biomasa húmeda de entrada (kg/s)"  
 REAL X\_e[1] "humedad de biomasa a la entrada en base seca(kg.H2O/kg.biomasa seca)"  
 REAL Y\_e[1] "humedad del gas a la entrada en base seca(kg.H2O/kg.gas seco)"  
 REAL Y\_s[m] "humedad del gas a la salida en base seca (kg.H2O/kg.gas seco)"  
 REAL Wgh\_e[m] "flujo másico de gas húmedo de entrada (kg/s)"  
 REAL mg[m] "masa de gas (kg)"  
 REAL Wevap[m] "flujo másico de evaporación (kg.H2O/s)"



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



```

REAL Xint_s[m]"Humedad interna de la biomasa en base seca (kg.H2O/kg.biomasa seca)"
REAL Wdif[m] "flujo másico de difusión (kg.H2O/s)"
REAL Xsup_s[m] "Humedad superficial de la biomasa a la entrada en base seca
(kg.H2O/kg.biomasa seca)"
REAL X_s[m] "humedad de biomasa a la salida en base seca (kg.H2O/kg.biomasa seca)"
REAL Xsup_e[1] "Humedad superficial de biomasa a la salida en base seca (kg.H2O/kg.biomasa
seca)"
REAL Tb_s[m] "temperatura de la biomasa(·C)"
REAL Tg_s[m] "temperatura del gas(·C)"
REAL Q[m] "calor transferido del gas hacia la superficie de la biomasa (kJ)"
REAL Sh[m] "relación de superficie húmeda-superficie seca"
REAL Hbh_s[m] "Entalpía de biomasa húmeda a la salida (kJ)"
REAL Hbh_e[1] "Entalpía de biomasa húmeda a la entrada (kJ)"
// PARA EL GAS DE ENTRADA
REAL Tg_e[1] "temperatura del gas de secado a la entrada de la cámara de secado (·C)"
REAL Fg_e[1] "flujo volumétrico de gas húmedo de secado a la entrada del secado (m3/s)"
REAL Hgh_s[m] "Entalpía del gas húmedo a la salida (kJ)"
REAL Hgh_e[1] "Entalpía del gas húmedo a la entrada (kJ)"
// REAL Ya "humedad del aire a la entrada del secador (kg.H2O/kg.aire seco)"
-----
--inicialización de las variables de estado
INIT
//RESTAURAR ESTADO
FOR(i IN 1,m)
mb[i] = 151.518 //+ (234.5425-151.518)*step(TIME,350000) + (131.8829
234.5425)*step(TIME,850000)
mg[i] = 5.56
Y_s[i] = 0.12 +i*0.0001
    
```



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$X_s[i] = 1.26 - i * 0.001$$

$$X_{sup}[i] = 0.8 - i * 0.0005$$

$$H_{bh}[i] = 9800 - i * 0.1$$

$$H_{gh}[i] = 397.6 - i * 0.0001$$

END FOR

CONTINUOUS

$$W_{gh_e}[1] = F_{g_e}[1] * p_{mg} * Pat / (R * (T_{g_e}[1] + 273)) // EC.50$$

$$// Y_e[1] = Y_a // EC.51$$

$$T_{g_e}[1] = (H_{gh_e}[1] - Y_e[1] * 2501) / (1 + 1.82 * Y_e[1]) // PARECIDA A LA EC.53 (esta 53 es de salida..)$$

-----  
 /\*Secador\*/

--BALANCE DE MASA para la biomasa /EC.22

$$mb[1]' = W_{b_e}[1] - W_{b_s}[1]$$

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD SUPERFICIAL

$$W_{b_e}[1] * X_{sup}[1] + mb[1] * X_{sup}[1]' = W_{b_e}[1] * X_{sup_e}[1] - W_{evap}[1] + W_{dif}[1]$$

--BALANCE MASICO DE LA HUMEDAD TOTAL

$$W_{b_e}[1] * X_s[1] + mb[1] * X_s[1]' = W_{b_e}[1] * X_e[1] - W_{evap}[1]$$

--BALANCE DE MASA

$$mg[1]' = W_{g_e}[1] - W_{g_s}[1]$$

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD DEL GAS DE SECADO

$$mg[1] * Y_s[1]' = W_{g_e}[1] * Y_e[1] - W_{g_s}[1] * Y_s[1] + W_{evap}[1]$$

--BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA DE LA BIOMASA

$$(W_{b_e}[1] + W_{b_e}[1] * X_s[1] + mb[1] * X_s[1]) * H_{bh_s}[1] + H_{bh_s}[1] * mb[1] * (1 + X_s[1]) = W_{b_e}[1] * (1 + X_e[1]) * H_{bh_e}[1] + Q[1] - W_{evap}[1] * (C_{pa} * T_{b_s}[1] + cl)$$

-- BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA DEL GAS DE SECADO

$$mg[1] * Y_s[1]' * H_{gh_s}[1] + H_{gh_s}[1] * mg[1] * (1 + Y_s[1]) = W_{g_e}[1] * (1 + Y_e[1]) * H_{gh_e}[1] - W_{g_s}[1] * (1 + Y_s[1]) * H_{gh_s}[1] - Q[1] + W_{evap}[1] * (C_{pa} * T_{b_s}[1] + cl)$$



--Relación humedad total-superficial-interna

$$X_{s[1]} = X_{int\_s[1]} + X_{sup\_s[1]}$$

--Relación de Calor transferido hacia parte húmeda y hacia parte seca de la biomasa

$$Q[1] = hb1 * Ak * (Tg\_s[1] - Tb\_s[1]) * Sh[1] + hb2 * Ak * (Tg\_s[1] - Tb\_s[1]) * (1 - Sh[1])$$

--Ecuación de evaporación en función de la diferencia de temperatura gas-biomasa

$$W_{evap[1]} = (Ak * hb1 / cl) * (Tg\_s[1] - Tb\_s[1]) * Sh[1]$$

--Ecuación de difusión en función de la diferencia de humedades /EC.410.

$$W_{dif[1]} = KD * (X_{int\_s[1]} - X_{sup\_s[1]}) / Sh[1]$$

--relación entre el flujo de la biomasa y la velocidad de la biomasa /EC.42

$$//Wb\_s[1] = Wb\_e[1] //$$

$$Wb\_s[1] = Wb\_e[1]$$

--Flujo volumétrico de gas en función del flujo másico de gas húmedo y la densidad del gas /EC.45

$$Fg[1] = Wg\_s[1] * (1 + Y\_s[1]) / dg$$

--Relación Superficie húmeda-Superficie seca de la biomasa /EC.46

$$Sh[1] = \min(1, X_{sup\_s[1]} / X_c)$$

--Interpolación para valores de entalpía de la biomasa en función de temperatura y humedad //EC.52

$$Hbh\_s[1] = Tb\_s[1] * (mb[1] * C_{pm} + mb[1] * X\_s[1] * C_{pa})$$

$$Hbh\_e[1] = Tb\_e[1] * (mb[1] * C_{pm} + mb[1] * X\_e[1] * C_{pa})$$

--temperatura del gas en función de la entalpía de una mezcla aire vapor de agua

$$Tg\_s[1] = (Hgh\_s[1] - Y\_s[1] * 2501) / (1 + 1.82 * Y\_s[1])$$

--Flujo de gas seco constante

$$Wg\_s[1] = Wg\_e[1]$$

--Relación de flujos de gas seco y húmedo

$$Wg\_e[1] = Wgh\_e[1] / (1 + Y\_e[1])$$

--Relación de flujos de biomasa seca y húmeda



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



$$Wb\_e[1]=Wbh\_e[1]/(1+X\_e[1])$$

////////////////////////////////////

EXPAND\_BLOCK ( j IN 2,m )

$$mb[j]'=Wb\_s[j-1]-Wb\_s[j]$$

$$Wb\_s[j-1]*Xsup\_s[j] + mb[j]*Xsup\_s[j]'=Wb\_s[j-1]*Xsup\_s[j-1]-Wevap[j] +Wdif[j]$$

$$Wb\_s[j-1]*X\_s[j] + mb[1]*X\_s[j]'=Wb\_s[j-1]*X\_s[j-1]-Wevap[j]$$

$$mg[j]'=Wg\_s[j-1]-Wg\_s[j]$$

$$Wg\_s[j]= Wg\_e[1]$$

$$mg[j]*Y\_s[j] + mg[j]*Y\_s[j]'=Wg\_s[j-1]*Y\_e[1]-Wg\_s[j]*Y\_s[j]+Wevap[j]$$

$$(Wb\_s[j-1]+Wb\_s[j-1]*X\_s[j]+mb[j]*X\_s[j]')*Hbh\_s[j] +Hbh\_s[j]*mb[j]*(1+X\_s[j]) = Wb\_s[j-1]*(1+X\_s[j-1])*Hbh\_s[j-1]+Q[j]-Wevap[j]*(Cpa*Tb\_s[j]+cl)$$

$$mg[j]*Y\_s[j]*Hgh\_s[j] + Hgh\_s[j]*mg[j]*(1+Y\_s[j]) = Wg\_s[j-1]*(1+Y\_e[1])*Hgh\_e[1]-Wg\_s[j]*(1+Y\_s[j])*Hgh\_s[j]-Q[j]+Wevap[j]*(Cpa*Tb\_s[j]+cl)$$

$$Wg\_s[j-1]=Wgh\_e[j]/(1+Y\_e[1])$$

$$Wb\_s[j-1]=Wbh\_e[j]/(1+X\_s[j-1])$$

$$X\_s[j]=Xint\_s[j]+Xsup\_s[j]$$

$$Q[j]=hb1*Ak*(Tg\_s[j]-Tb\_s[j])*Sh[j]+hb2*Ak*(Tg\_s[j]-Tb\_s[j])*(1-Sh[j])$$

$$Wevap[j]=(Ak*hb1/cl)*(Tg\_s[j]-Tb\_s[j])*Sh[j]$$

$$Wdif[j]=KD*(Xint\_s[j]-Xsup\_s[j])/Sh[j]$$

$$Wb\_s[j]= Wb\_e[1]// Wb\_s[j]= Wb\_e[1]$$

$$Fg[j]=Fg[1]//Wg\_s[j]*(1+Y\_s[j])/dg$$

$$Sh[j]=min(1, Xsup\_s[j]/Xc)$$

$$Hbh\_s[j] = Tb\_s[j]*(mb[j]*Cpm+mb[j]*X\_s[j]*Cpa)$$

$$Tg\_s[j]=(Hgh\_s[j]- Y\_s[j]* 2501)/(1+1.82*Y\_s[j]) // EC. 53$$

END EXPAND\_BLOCK

END COMPONENT



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 6.5 Anexo N°5 “Código Experimento Ecosimpro”

/\*-----\*/

LIBRARY: CONTROL\_EXAMPLES\_BOOK

COMPONENT: Prueba

PARTITION: partition1

EXPERIMENT: exp1

TEMPLATE: TRANSIENT

CREATION DATE: 17/03/2022

-----\*/

EXPERIMENT exp1 ON Prueba.partition1

DECLS

OBJECTS

INIT

-- initial values for state variables

BOUNDS

-- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)

Ak = 0.2143

Tb\_e[1] = 10 //+ 20\*step(TIME,350000) - 15\*step(TIME,880000)

Tg\_e[1] = 80 //- 40\*step(TIME, 350000)+ 20\*step(TIME,850000)

Wbh\_e[01] = 0.0125//2568//\*

Wgh\_e[01] = 5// - 4.8\*step(TIME,350000) + 3\*step(TIME,850000)// aprox 5.43 m3/s -->

X\_e[1] = 1.26 //- 0.8\*step(TIME,350000) + 1\*step(TIME,850000)

Xsup\_e[1] = 0.8

Y\_e[1] = 0.12 // - 0.5\*step(TIME,350000)+ 3\*step(TIME,800000) //

BODY

-- creates an ASCII file with the results in table format



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



```
-- REPORT_TABLE("results.rpt", "*")

-- set the debug level (valid range [0,4])

DEBUG_LEVEL= 1

-- select default integration solver. Valid methods are IDAS (_SPARSE), DASSL(_SPARSE),
CVMODE_BDF(_SPARSE), CVMODE_AM, RK4, EULER, AM1, AM2 and AM4

IMETHOD= IDAS -- default is DASSL, recommended is either IDAS or IDAS_SPARSE

-- set tolerances and other important inputs

REL_ERROR = 1e-006 -- transient solver relative tolerance

ABS_ERROR = 1e-006 -- transient solver absolute tolerance

TOLERANCE = 1e-006 -- steady solver relative tolerance

INIT_INTEG_STEP = -1 -- initial integration step size (-1 means use the solver estimation)

MAX_INTEG_STEP = -1 -- maximum integration step size (-1 means use the solver
estimation)

NSTEPS = 1 -- Only for explicit solvers use CINT/NSTEPS as integration step size

REPORT_MODE = IS_EVENT -- by default it reports results at every CINT and event
detection. Other valid options are IS_STEP, IS_CINT and IS_MANUAL_REFRESH

-- simulate a transient in range[TIME,TSTOP] reporting every CINT

TIME = 0

TSTOP = 400000

CINT = 100

INTEG()

END EXPERIMENT
```



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 6.6 Anexo N°6 “Código modelos PORT y simulación (MATLAB)”

`%% Modelo primer orden para variación de temperatura del gas de secado de entrada`

```
K = (0.7286-0.1781)/(40); %Ganancia del sistema
k28 = 0.1781+K*0.28*40;
k63 = 0.1781+K*0.63*40;
t28 = 407752-350000;
t63 = 488811-350000;
T = (t63-t28)*(3/2);
L = t63-T;
```

`%%L/T % este valor debería estar entre 0.1-0.5`

```
modelo = tf(-K,[T 1]);
modelo.IODelay = L

t = (0:1:1200000);
u = -40*(t>=350000) + 20*(t>=850000);
a = lsim(modelo,u,t)+0.1781;
subplot(2,1,1)
plot(u,'red'), grid on
title('Variacion de la temperatura del gas de secador')
legend('Tg_e[1]')
subplot(2,1,2)
plot(a), grid on
title('Humedad de la biomasa a la salida del secador')
legend('X_s[10]')
```

`%% Modelo primer orden para variaciones del flujo masico del gas de secado`

```
K = (0.241-0.1781)/(4.8); %Ganancia del sistema
k28 = 0.1781+K*0.28*4.8;
k63 = 0.1781+K*0.63*4.8;
t28 = 423122-350000;
t63 = 499757-350000;
T = (t63-t28)*(3/2);
L = t63-T;
```

`%%L/T % este valor debería estar entre 0.1-0.5`

```
modelo = tf(-K,[T 1]);
modelo.IODelay = L

t = (0:1:1300000);
u = - 4.8*(t>=350000) + 3*(t>=850000);
```



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



```

b = lsim(modelo,u,t)+0.1781;
subplot(2,1,1)
plot(u,'red'),grid on
title('Variacion del flujo masico de gas de secado')
legend('Wgh_e[1]')
subplot(2,1,2)
plot(b), grid on
title('Humedad de la biomasa a la salida del secador')
legend('X_s[10]')

%% Modelo de primer orden para variación de la humedad de entrada

K = (0.0318-0.1781)/(0.8); %Ganancia del sistema
k28 = 0.1781+K*0.28*0.8;
k63 = 0.1781+K*0.63*0.8;
t28 = 508250-350000;
t63 = 535503-350000;
T = (t63-t28)*(3/2);
L = t63-T;

%L/T % este valor deberia estar entre 0.1-0.5

modelo = tf(-K,[T 1]);
modelo.IODelay = L

t = (0:1:1400000);
u = - 0.8*(t>=350000) + 1*(t>=850000);
c = lsim(modelo,u,t)+0.1781;
figure()
subplot(2,1,1)
plot(u,'red'),grid on
title('Variacion de humedad de entrada de la biomasa')
legend('X_e[1]')
subplot(2,1,2)
plot(c),grid on
title('Humedad de la biomasa a la salida del secador')
legend('X_s[10]')

%% Modelo de primer orden para variación de la temperatura de biomasa de entrada
K = (0.6174-0.1781)/(20); %Ganancia del sistema
k28 = 0.1781+K*0.28*20;
k63 = 0.1781+K*0.63*20;
t28 = 576135.7-350000;
t63 = 647388-350000;
T = (t63-t28)*(3/2);
L = t63-T;

%L/T % este valor deberia estar entre 0.1-0.5

modelo = tf(K,[T 1]);

```



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



```
modelo.IODelay = L

t = (0:1:1400000);
u = 20 *(t>=350000) - 15*(t>=880000);
c = lsim(modelo,u,t)+0.1781;
figure()
subplot(2,1,1)
plot(u,'red'),grid on
title('Variacion de la temperatura de entrada de la biomasa')
legend('Tb_e[1]')
subplot(2,1,2)
plot(c),grid on
title('Humedad de la biomasa a la salida del secador')
legend('X_s[10]')
```



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Biomasa, la renovable número uno de la matriz energética chilena – Asociación Chilena de la Biomasa.” <https://achbiom.cl/biomasa-la-renovable-numero-uno-de-la-matriz-energetica-chilena/> (accessed Aug. 15, 2021).
- [2] L. K. dos S. Oliveira, R. D. M. Rêgo, M. N. M. de A. Frutuoso, and S. S. F. B. Rodrigues, “Simulação Computacional Da Eficiência Energética Para Uma Arquitetura Sustentável,” *Holos*, vol. 4, p. 217, 2016, doi: 10.15628/holos.2016.3981.
- [3] A. Herguedas, C. Taranco, E. Rodríguez, and prado Paniagua, “Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad,” *Transbioma*, vol. 13, no. 2, pp. 105–109, 2012.
- [4] E. Martines and L. Lira, “Análisis y aplicacion de las expresiones del contenido de humedad en sólidos,” *Cent. Metrol.*, pp. 1–6, 2010, [Online]. Available: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>.
- [5] R. Carmona and A. Urzua, “Caracterización de biomasa leñosa con fines energéticos disponible en Chile,” *CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA LEÑOSA CON FINES ENERGÉTICOS 2013*. <https://libros.uchile.cl/files/presses/1/monographs/398/submission/proof/files/assets/basic-html/index.html#27> (accessed Aug. 12, 2021).
- [6] J. Gysling, C. Daniel, and S. Aguirre, “Industria Forestal Primaria en Chile,” 2006, [Online]. Available: [http://www.lignum.cl/wp-content/uploads/sites/6/2017/09/Industria\\_Forestal\\_Primary\\_en\\_Chile.pdf](http://www.lignum.cl/wp-content/uploads/sites/6/2017/09/Industria_Forestal_Primary_en_Chile.pdf).
- [7] Gobierno de Chile, “Los beneficios de la calefacción con pellets – MMA.” <https://mma.gob.cl/los-beneficios-de-la-calefaccion-con-pellets/> (accessed Aug. 13, 2021).
- [8] STELA, “Secador de cinta más largo a Chile- Stela Laxhuber - tecnología de secado.” [https://www.stela.de/es/archiv\\_menus\\_vor\\_2017/archiv/prensa/longest-belt-dryer-to-chile\\_gxrm0bgg.html?&highlight=1&keys=CHILE&lang=3](https://www.stela.de/es/archiv_menus_vor_2017/archiv/prensa/longest-belt-dryer-to-chile_gxrm0bgg.html?&highlight=1&keys=CHILE&lang=3) (accessed Aug. 13, 2021).
- [9] S. Bi, B. Zhang, L. Mu, X. Ding, and J. Wang, “Optimization of tobacco drying process control based on reinforcement learning,” *Dry. Technol.*, vol. 38, no. 10, pp. 1291–1299, 2020, doi: 10.1080/07373937.2019.1633662.1
- [10] P. R. Pablo, “Controlador no lineal predictivo y adaptativo aplicado a un proceso de secado de granos de cacao .”



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



- [11] H. Perazzini, M. T. B. Perazzini, F. B. Freire, F. B. Freire, and J. T. Freire, “Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy,” *Renew. Energy*, vol. 175, pp. 167–178, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.04.144.
- [12] P. P. Rosero, W. I. Alama, J. M. Silupu, and J. Oliden, “Temperature Nonlinear Model Predictive Controller (NMPC) for a Dryer Plant of Cocoa Beans,” pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/ica-acca.2016.7778388.
- [13] J. Soto, “Control y supervisión en línea de un secador para el proceso industrial de la harina de pescado,” pp. 0–4, 2020.
- [14] “Drying technology,” *Dry. Technol.*, vol. 10, no. 2, p. 318, 1992, doi: 10.1080/07373939208916439.
- [15] J. R. Dávila Nava, “Capítulo 4: Procesos de secado,” *Estud. Exp. del Ef. la porosidad partículas sobre el proceso secado en un lecho Fluid. a vacío empleando aire*, pp. 51–73, 2004, [Online]. Available: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/davila\\_n\\_jr/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo4.pdf).
- [16] F. R. Rubio, C. Bordons, J. Holgado, and I. S. Rivas, “Modelling and  $H_{\infty}$  control of a rotary dryer,” *2001 Eur. Control Conf. ECC 2001*, vol. 33, no. 4, pp. 733–738, 2001, doi: 10.1016/s1474-6670(17)38230-7.
- [17] J. Vidales, Villalba, Armando and N. de la Peña, Arzola, “Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa mathematical and experimental models for drying of biomass,” *Ing. y Desarro.*, vol. 33, no. 2, pp. 301–330, 2015.
- [18] P. Quiñones-Reyes, J. A. Ramos-Frutos, I. M. Robles-Onofre, and L. Flores-Ávila, “Control de un Secador Híbrido mediante Lógica Difusa a partir del Diseño de Experimentos EDU-11,” 2017.
- [19] A. Dai, X. Zhou, and X. Liu, “Design and simulation of a genetically optimized fuzzy immune PID controller for a novel grain dryer,” *IEEE Access*, vol. 5, no. c, pp. 14981–14990, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2733760.
- [20] S. Kouro and R. Musalem, “Control mediante lógica difusa,” *Técnicas Mod. Autom.*, pp. 1–7, 2002, [Online]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>.
- [21] Walter J. D. Cova, “Control PID Un enfoque descriptivo,” *Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis*, pp. 1–30, 2005, [Online]. Available:



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



[https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book\\_part](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book_part).

- [22] E. Fernández Camacho and C. Bordóns Alba, “Control Predictivo: Pasado, presente y futuro,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 1, no. 3, pp. 5–28, 2004.
- [23] C. H. Guzmán-Valdivia, J. L. Carrera-Escobedo, M. A. García-Ruíz, A. Ortíz-Rivera, and O. Désiga-Orenday, “Design, development and control of a portable laboratory for the chili drying process study,” *Mechatronics*, vol. 39, pp. 160–173, 2016, doi: 10.1016/j.mechatronics.2016.05.003.
- [24] I. O. Benítez-González and R. Rivas-Perez, “Predictor de Smith: revisión y desafíos,” *Rev. Ing. Electrónica, Automática y Comun.*, vol. 38, no. 1, pp. 33–47, 2017.
- [25] D. D. E. I. Eléctrica, O. Ignacio, and C. Conejero, “Uso de estrategia de control de Predictor de Smith en Microcanal,” 2016.
- [26] U. Bío-bío, “Diseño Térmico de un secador de banda para biomasa,” 2021.
- [27] M. Rogelio, M. Alejandro, and R. Almudena, “Diseño de librerías de procesos con ecosimpro.”
- [28] E. García Díaz, “Simulación de Sistemas de Energías Renovables en EcosimPro,” 2016.
- [29] R. Santos, “Simulación dinámica de una planta de intercambio de calor,” 2020
- [30] G. S. Manual, “EcosimPro 2019,” 2019.
- [31] M. Esther and R. López, “Diseño E Implementación De Un Sistema Rotatorio De Flujo Constante Para Secado De Cacao Utilizando Transferencia De Calor Por Convección Y Control Predictivo Basado En Modelo. Autores:,” p. 198, 2012.