



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño del sistema de control de un proceso de evaporación para concentrar zumo de granada.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Vallés Agulló, Pau

Tutor/a: Cardona Navarrete, Salvador Cayetano

Cotutor/a: Hilario Caballero, Adolfo

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Resumen

En este proyecto final de grado se pretende realizar el diseño del sistema de control de un proceso de evaporación en el cual se concentra zumo de granada. Ello implica una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de modelos dinámicos que pueden aplicarse a unidades de evaporación, planteando e implementando el modelo matemático final que se ha obtenido. También se han revisado las diferentes estrategias de control aplicables a este tipo de operación básica, así como la instrumentación y los actuadores más adecuados para el proceso. Se ha planteado la estrategia de control más adecuada, se ha implementado los lazos de control correspondientes en Matlab/Simulink y se ha diseñado los controladores. Posteriormente se ha realizado una estimación económica de la aplicación de esta metodología de diseño de sistemas de control.

Palabras clave: evaporación; Matlab/Simulink; control de procesos; modelado matemático; zumo de granada.

Resum

En aquest projecte fi de grau es pretén realitzar el diseny del sistema de control d'un procés de evaporació que es concentra suc de magrana. Això implica gran revisió bibliogràfica dels diferents tipus de models dinàmics que poden aplicar-se a unitats d'evaporació, plantejant e implementant el model matemàtic final que s'ha obtingut. També s'han revisat les diferents estratègies de control aplicables a aquesta mena d'operació bàsica, així com l'instrumentació i actuadors més adequats per al procés. S'ha plantejat l'estratègia de control més adequada, s'ha implementat els llaços de control corresponents amb l'ajuda de Matlab/Simulink y s'han disenyat els controladors adequats. Posteriorment s'ha realitzat una estimació econòmica de la aplicació de esta metodologia de diseny del sistema de control.

Paraules clau: evaporació; Matlab/Simulink; control de processos; model matemàtic; suc de magrana.

Abstract

The aim of this final degree project is to design a control system for an evaporation process in which pomegranate juice is concentrated, this involves a bibliographical review of the different types of dynamic models that can be applied to evaporation units, proposing and implementing the final mathematical model that has been obtained. The different control strategies applicable to this type of basic operation have also been reviewed, as well as the most suitable instrumentation and actuators for the process. The most suitable control strategy has been proposed, the corresponding control loops have been implemented in Matlab/Simulink and the controllers have been designed. Subsequently, an economic estimate was made of the application of this control system design methodology.

Keywords: evaporation; Matlab/Simulink; process control; mathematical model; pomegranate juice.

Índice

Resumen	1
Resum	1
Abstract	2
Índice	3
Tablas	6
Figuras.....	7
1 Introducción.....	9
1.1 Zumo de granada.....	10
1.1.1 Composición química y calidad del zumo de granada	11
1.1.2 Beneficios del zumo de granada.....	16
1.2 Concentración de zumos.....	17
1.2.1 Evaporación.....	18
1.2.1.1 Proceso de evaporación.....	18
1.2.1.1.1 Diferencia de temperatura entre el vapor y el líquido a evaporar	18
18	
1.2.1.1.2 Película limitante.....	19
1.2.1.1.3 Depósitos en la superficie de transferencia de calor	19
1.2.1.2 Evaporador	19
1.2.1.3 Evaporadores en la industria alimentaria	20
1.2.1.3.1 Evaporadores de recompresión térmica de vapor (TVR).....	21
1.2.1.3.2 Evaporador discontinuo	22
1.2.1.3.3 Evaporador de película ascendente-descendente	22
1.2.1.3.4 Evaporador térmico acelerado de corta duración (T.A.S.T.E)....	23
1.2.1.3.5 Evaporador multiefecto.....	24
2 Objetivos.....	25
2.1 Objetivo técnico	25
2.2 Objetivo académico.....	25
2.3 Objetivos de desarrollo sostenible.....	26
3 Proceso.....	27

3.1	Descripción del proceso	27
3.2	Introducción al proceso a modelar	27
3.3	Consideraciones a tener en cuenta	28
3.4	Condiciones de operación del proceso	28
3.5	Modelo dinámico.....	30
3.5.1	Balance de materia total.....	30
3.5.2	Balance de materia por componentes	31
3.5.3	Balance de energía	32
3.6	Correlaciones necesarias para el proceso	35
3.7	Régimen nominal de operación.....	39
3.8	Simulación dinámica del proceso	40
4	Control del proceso	48
4.1	Introducción al control de procesos.....	48
4.1.1	Variables del proceso.....	48
4.1.2	Sistema de control.....	49
4.2	Sistema de control.....	49
4.2.1	Identificación de las variables y de los lazos de control	49
4.2.1.1	Variables a controlar	50
4.2.1.2	Puntos de consigna	50
4.2.1.3	Variables que afectan	50
4.2.1.4	Variables de control.....	51
4.2.1.5	Variables perturbación	51
4.2.2	Lazos de control establecidos	51
4.3	Identificación de las funciones de transferencia del proceso.....	52
4.3.1	Obtención de las funciones de transferencia	52
4.4	Diagramas de bloques del sistema de control.....	57
4.5	Lugar geométrico de las raíces.....	58
4.6	Control mediante desacoplo inverso	61
4.6.1	Obtención de la red de desacoplo inverso	61
5	Estimación económica	65
6	Conclusiones.....	66
7	Bibliografía.....	67

8	Anexos	71
8.1	Anexo 1: Entalpía de zumo de granada	71
8.2	Anexo 2: Temperatura y presión de saturación del agua.....	72
8.3	Anexo 3: Calor latente de vaporización del agua.....	73
8.4	Anexo 4: Entalpía del agua líquida.....	74
8.5	Anexo 5: Densidades de la glucosa, fructosa y agua	75
8.6	Anexo 6: Deducción general de la ecuación de la densidad de zumo de granada.	75
8.7	Anexo 7. Deducciones de las entalpías parciales.....	76
8.8	Anexo 8: Constantes de las ecuaciones	77
8.9	Anexo 9: Calor específicos de vapor saturado de agua	77

Tablas

Tabla 1. Requerimientos higiénicos [7].....	12
Tabla 2. Requerimientos ambientales [7]	12
Tabla 3. Color [7]	13
Tabla 4. Ácidos, Azúcares y Minerales [7]	13
Tabla 5. Aminoácidos [7]	14
Tabla 6. Antocianos [7].....	15
Tabla 7. Polifenoles totales y capacidad antioxidante [7]	15
Tabla 8. Estudios realizados de los beneficios del zumo de granada [7]	16
Tabla 9. Ecuaciones del proceso.....	35
Tabla 10. Variables mediante correlaciones	39
Tabla 11. Variables	40
Tabla 12. Ecuaciones utilizadas en la simulación dinámica	41
Tabla 13. Datos iniciales	42
Tabla 14. Propiedades en R.N. de operación	42
Tabla 15. Identificación de las variables del proceso	49
Tabla 16. Lazos de control.....	51
Tabla 17. Nomenclatura de control.....	52
Tabla 18. Funciones de transferencia.....	53
Tabla 19. Valores de los parámetros de los controladores	60
Tabla 20. Coste económico del sistema de control [24].....	65
Tabla 21. Entalpía de zumo de granada [19].....	71
Tabla 22. Presión de saturación del agua [20].....	72
Tabla 23. Calor latente de vaporización del agua líquida [20].....	73
Tabla 24. Entalpía de agua líquida [20]	74
Tabla 25. Densidades de la glucosa, fructosa y el agua.....	75
Tabla 26. Constantes.....	77
Tabla 27. Calor específico de vapor saturado de agua [21]	77

Figuras

Figura 1. Porcentaje de producción de granado en España 2020 [1]	10
Figura 2. Partes de una granada [2]	11
Figura 3. Evaporador de recompresión térmica de vapor (TVR) [13]	21
Figura 4. Evaporador discontinuo [14]	22
Figura 5. Evaporador de película ascendente-descendente [14]	23
Figura 6. Evaporador térmico acelerado de corta duración (T.A.S.T.E) [15]	24
Figura 7. Evaporador Multiefecto [16].....	24
Figura 8. ODS del trabajo [17]	26
Figura 9. Intercambiador de calor	29
Figura 10. Diferentes tipos de modelos matemáticos.....	30
Figura 11. Evaporador en Simulink	43
Figura 12. Régimen Nominal de operación	43
Figura 13. Escalón positivo del 4% de mF.....	44
Figura 14. Escalón negativo del 4% de mF	44
Figura 15. Escalón positivo del 4% de mVE	44
Figura 16. Escalón negativo del 4% de mVE	44
Figura 17. Escalón positivo del 4% de WF	44
Figura 18. Escalón negativo del 4% de WF	44
Figura 19. Escalón positivo del 4% TF	45
Figura 20. Escalón negativo del 4% TF.....	45
Figura 21. Escalón positivo del 4% pvv.....	45
Figura 22. Escalón negativo del 4% pvv	45
Figura 23. Escalón positivo del 4% mE	45
Figura 24. Escalón negativo del 4% mE	45
Figura 25. Proceso industrial [22].....	48
Figura 26. Sistema de control [22]	49
Figura 27. Identificación G	55
Figura 28. Identificación G1D1.....	55
Figura 29. Identificación G2D1.....	55
Figura 30. Identificación G1D2.....	55
Figura 31. Identificación G2D2.....	55
Figura 32. Identificación G1D3.....	56
Figura 33. Identificación G2D3.....	56
Figura 34. Identificación G2D4.....	56
Figura 35. Diagrama de bloques juntando los lazos de control.....	57
Figura 36. Funciones de transferencia de las perturbaciones	58
Figura 37. LGR_y1	59
Figura 38. LGR_y2	59

Figura 39. LGR_LA ₁	60
Figura 40. LGR_LA ₂	60
Figura 41. Control. Escalones yr1, yr2, d1.....	62
Figura 42. Control. Escalones, d2, d3, d4.....	62
Figura 43. Sistema de control con desacoplo en Simulink	63
Figura 44. Control con desacoplo. Escalones yr1, yr2, d1.....	64
Figura 45. Control con desacoplo. Escalones d2, d3, d4.....	64

1 Introducción

En el mercado la mayoría de frutas y hortalizas tienen poco tiempo útil de utilización y se cultivan en una determinada parte del planeta, ya que no todas se pueden cultivar en cualquier parte siendo un problema a tener en cuenta. Por otro lado, estas son esenciales para la actividad humana ya que es una fuente de nutrientes para el ser humano y por ende para su salud.

Debido a que no todas las frutas se pueden producir en todo el planeta se procesan mediante procesos industriales aumentando su vida útil, pudiendo así abastecer a todo el planeta. Los procesos industriales utilizados son, entre otros, el secado, producción de zumo, concentración, etc.

Al obtener el zumo de frutas se queda con gran cantidad de agua produciendo un coste de procesado, transporte y almacenamiento, elevando su coste económico. Debido a esto es necesario una solución industrial para reducir estos costes en la industria, por lo que se está estudiando gran parte de estos procesos para poder optimizarlos.

Para poder subsanar el problema industrial, expresado en el anterior párrafo, a los zumos de frutas se le está aplicando el proceso de concentración, consistiendo en la separación de gran parte del agua que contiene el zumo. Esto implica una reducción de coste de transporte, almacenamiento y embalaje, al poder transportar gran cantidad y almacenarla en lugares más pequeños o en lugares iguales con una mayor cantidad.

Los zumos contienen grandes nutrientes, que son los que caracterizan al zumo, por lo que se tienen que mantener en su estado natural. Debido a esto se tienen que controlar estos nutrientes para que al procesar el zumo no se dañen o desaparezcan, lo que implicarán unas restricciones al proceso que se tenga que someter al zumo. Por ende, se tienen que conocer y entender a la perfección las condiciones a las que se procesa el producto.

Estudios que se han realizado en un periodo de tiempo relativamente corto han resultado que uno de los zumos en los que se están conociendo beneficios para la salud es el zumo de granada y se encuentra una gran parte de la plantación en el territorio español. En este trabajo ahondaremos en el proceso de concentración de zumo de granada, realizando un estudio y modelado de la dinámica del proceso, y por otro lado el de controlarlo mediante técnicas de control de procesos

1.1 Zumo de granada

Se denomina zumo de granada al extracto de granada realizado mecánicamente. Los diferentes tipos de zumo de granada están caracterizados por la variedad de granada con la que se obtenga. Por ello, se debe de conocer las granadas con las que se realiza el zumo para poder conocer las características de este.

La granada es una fruta que proviene del granado que se data de que es uno de los primeros frutales que se cultivaron por las civilizaciones humanas. En la actualidad tiene gran variedad de países que lo cultivan, teniendo así gran variedad de tipos de clases de granada al cultivarse en cada país un tipo. Este fruto tiene como nombre científico 'Punica Granatum'.

En lo referente al territorio español predomina el cultivo de 'Mollar de Elche', con denominación de origen registrada, encontrándose en la provincia de Alicante, C.Valenciana. Expresado de manera gráfica en la Figura 1.

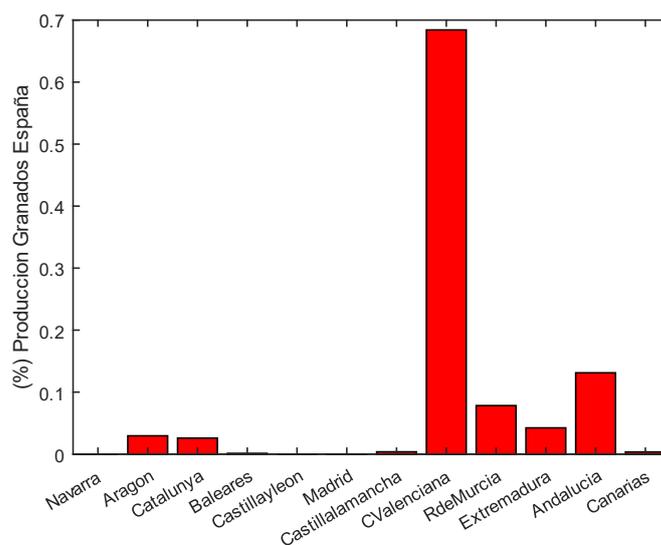


Figura 1. Porcentaje de producción de granado en España 2020 [1]

Referente a las partes que componen el fruto de granada se pueden dividir en dos partes, una que no es comestible, donde pertenece la corteza y las membranas carpelares y otra que lo es, perteneciendo los arilos y las semillas, como se puede comprobar en la Figura 2, [2].



Figura 2. Partes de una granada [2]

El extracto de la granada, que en este trabajo es objetivo, se obtiene de los arilos, separándolo de las semillas, mediante la combinación de técnicas industriales de extracción mecánicas y otras de estabilización, para que se pueda almacenar durante largos periodos de tiempo, entre los que se encuentran la pasteurización [3], tratamientos con microondas [4], altas presiones [5], irradiación y calentamiento óhmico [6], entre otras.

1.1.1 Composición química y calidad del zumo de granada

Se han obtenido conclusiones de estudios realizados en las que determinan que el zumo de granada tiene beneficios para el correcto funcionamiento del ser humano, lo que ha producido un aumento del valor en el mercado. Para ello se tiene que realizar estudios científicos e industriales para que se pueda optimizar la producción y la conservación de este al tener una gran demanda, teniendo en cuenta el menor coste posible.

En este trabajo se centrará en los estudios que se han realizado a la variedad Molar de Elche, ya que como se ha mencionado en anterioridad cada variedad tiene una composición química particular.

La composición química del zumo de granada depende de varios factores del fruto, como bien se muestra seguidamente, [7].

- La variedad de fruto de granada
- La zona de cultivo
- El clima de donde se cultiva
- Las técnicas que se emplean en la cultivación
- El grado de maduración que se encuentre cuando se realiza la extracción
- Las condiciones de procesado
- Las técnicas de extracción
- Las condiciones de almacenamiento

Para la obtención de la composición química, se han realizado varios estudios que demuestran la concentración de los compuestos que componen el zumo de granada, representados en las siguientes tablas (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7). Que estos son necesarios para que cumpla con los requisitos que AIJN European Fruit Juice Association estableció para el zumo de granada.

Tabla 1. Requerimientos higiénicos [7]

Requerimientos higiénicos		
Ácido Acético	g/l	0,358
Etanol	g/l	0,05
Ácido D/l Láctico	g/l	0,11
Patulina	µg/l	5

La poca presencia de ácido acético, etanol y ácido láctico, como bien muestra la Tabla 1, denota que es una buena calidad de producto de partida y un correcto procesado, al ser estos indicadores de contaminantes por microorganismos.

La patulina es un compuesto que se genera debido a la presencia de hongos. Esta presencia de hongos se relaciona por la podredumbre de producto, por lo que, la escasa presencia de este denota una buena calidad de la granada.

Tabla 2. Requerimientos ambientales [7]

Requerimientos ambientales		
Arsénico (As)	mg/l	< 0,005
Plomo (Pb)	mg/l	< 0,01
Mercurio (Hg)	mg/l	< 0,01
Cadmio (Cd)	mg/l	< 0,01

La presencia o no de estos metales pesados, que se muestran en la Tabla 2, se debe a la contaminación de los suelos y los fertilizantes utilizados presentes en

el suelo donde se ha cultivado la granada. Estos metales pesados son los más perjudiciales para el consumo humano, es por ello que al realizar el estudio de estos en el zumo no se obtuvo información, al no alcanzar el rango de detección de la espectrometría de absorción atómica.

Tabla 3. Color [7]

Color		
5-Hidroximetilfural (5-HMF)	mg/l	1

La poca presencia de 5-HMF, como muestra la Tabla 3, es un indicador de que no se han realizado reacciones químicas de los compuestos orgánicos por lo que el zumo de granada no tiene presencia de colores marrones, indicando así una buena calidad y poca degradación, [8].

Tabla 4. Ácidos, Azúcares y Minerales [7]

Ácidos, Azúcares y Minerales		
Ácido cítrico	g/l	2,52
Ácido d-isocítrico	mg/l	20
Ácido L-málico	g/l	1,32
Ácido D-málico	mg/l	10
Sodio (Na)	mg/l	4,88
Potasio (K)	mg/l	2597,5
Magnesio (Mg)	mg/l	22,56
Calcio (Ca)	mg/l	22,56
Fósforo (P)	mg/l	84
Cobre (Cu)	mg/l	0,23
Zinc (Zn)	mg/l	0,52
Hierro (Fe)	mg/l	0,2
Estaño (Sn)	mg/l	< 0,05
Nitrato (NO ₃)	mg/l	3
Sulfato (SO ₄)	mg/l	92,37
Glucosa	g/l	63,2
Fructosa	g/l	66,65
Sacarosa	g/l	2
Extracto libre de azúcar	g/l	35,52
Sorbitol	mg/l	46,16

Como bien muestra la Tabla 4, los valores bajos de ácidos orgánicos que se encuentran en el zumo denotan que tiene un carácter escaso de acidez, ya que estos ácidos representan unas características sensoriales al zumo. Por el contrario, los azúcares presentes en el zumo se encuentra en elevadas concentraciones, lo que

indica un carácter dulce del zumo, teniendo la glucosa y la fructosa mayor presencia. La presencia de minerales también se debe de tener en cuenta en la composición química del zumo de granada, al tener un carácter negativo su presencia en enfermedades de los humanos. Pero como se demuestra poseen valores correctos para el consumo humano. La presencia de nitratos y sulfatos se debe a su utilización en el cultivo. Se observan niveles bajos de nitratos, pero elevados de sulfatos, pero están establecidos dentro del rango permitido para el consumo humano.

Tabla 5. Aminoácidos [7]

Aminoácidos		
Ácido aspártico	mg/l	119
Serina	mg/l	123,25
Ácido glutámico	mg/l	137,8
Glicina	mg/l	14
Histidina	mg/l	6,8
Asparraguina	mg/l	17
Glutamina	mg/l	158,75
Arginina	mg/l	69,5
Treonina	mg/l	13
Alanina	mg/l	35,2
Prolina	mg/l	22
Cisterna	mg/l	< 5
Tirosina	mg/l	16,25
Valina	mg/l	40,33
Metionina	mg/l	20
Lisina	mg/l	7,2
Isoleucina	mg/l	< 5
Leucina	mg/l	5,33
Fenialanina	mg/l	5

Las concentraciones de aminoácidos son importantes para el funcionamiento correcto del ser humano y afectando en la calidad del zumo de granada dándole características como sabor, aroma y color, como indica la Tabla 5.

Tabla 6. Antocianos [7]

Antocianos		
Delfinidina 3,5-diglucosido		
Zumo fresco	mg/l	26,65
Procesado y almacenado	mg/l	17,87
Cianidina 3,5-diglucosido		
Zumo fresco	mg/l	39,13
Procesado y almacenado	mg/l	19,3
Pelargonidina 3,5-diglucosido		
Zumo fresco	mg/l	2,19
Procesado y almacenado	mg/l	1,62
Delfinidina 3-glucosido		
Zumo fresco	mg/l	21,59
Procesado y almacenado	mg/l	5,25
Cianidina 3-glucosido		
Zumo fresco	mg/l	60,43
Procesado y almacenado	mg/l	12,91
Pelargonidina 3-glucosido		
Zumo fresco	mg/l	9,06
Procesado y almacenado	mg/l	1,55

Como la Tabla 6 muestra los antocianos presentes en el zumo de granada, estos son muy importantes ya que estos le dan color. Por lo que se debe de tener en cuenta ya que pueden variar en gran medida al procesar o almacenar. Por lo expuesto en la bibliografía se conoce que se empiezan a degradar a partir de los 90 °C, [9].

Tabla 7. Polifenoles totales y capacidad antioxidante [7]

Polifenoles totales y capacidad antioxidante		
Polifenoles totales	mg/l	2402,16
Capacidad antioxidante	mg/l	
Transferencia de electrones		
ABTS	mmol Trolox/l	23,78
FRAP	mmol Fe ²⁺ /l	322,26
	mmol Trolox/l	13,04
Transferencia de Hidrogeno		
ORAC	mmol Trolox/l	10,11

Los polifenoles presentes en el zumo son polifenoles antioxidantes al tener una elevada concentración de estos, como indica la Tabla 7, dan un carácter antioxidante al zumo de granada. Esto caracteriza al zumo de granada por tener un beneficio en el cuerpo humano

1.1.2 Beneficios del zumo de granada

Como se puede demostrar en la Tabla 8 se observan los diferentes beneficios del zumo de granada que se han podido estudiar, teniendo claros resultados positivos al poder demostrar que pueden tener beneficios para el ser humano.

Tabla 8. Estudios realizados de los beneficios del zumo de granada [7]

Estado clínico	Parte de la planta	Dosis	Tiempo	Efecto
Saludable	Zumo	-	28	Protección antioxidante de numerosas enzimas
Saludable	Ácido elágico	60 mg/(kg*d)	45	Reducción del colesterol, ácidos grasos libre, triglicéridos y fosfolípidos
Saludable	Zumo	250 ml/d	28	Reducción de la oxidación lipídica y del LDL-colesterol
Saludable	Extracto ác. elágico	100 mg/día	28	Poder inhibitorio de radiaciones ultravioletas de pieles claras
Saludable	Todas las partes			Inhibición de la desgranulación de reacciones alérgicas
Diabéticos	Zumo	40 g	56	Reducción del LDL-colesterol
Cáncer	Acido púnico	40 µM		Inhibición de la proliferación de células cancerígenas en un 92-96%
Niveles elevados de PSA	Zumo	8 onzas	519	Reducción del 12% de la proliferación y una apoptosis 17% mayor
Saludable	Zumo	3 ml	1h	Inhibición del metabolismo intestinal de tolbutamida
Cáncer	Zumo fermentado	-		Ralentización de la metástasis de células mamarias
Aterosclerosis	Zumo	-	60	Gran actividad antiateroesclerosis
Saludable	Zumo	-	2	Presencia de urolitinas en la orina de humanos
Saludable	Zumo	300 ml/d	14	Descenso de la presión sistólica
Síndrome metabólico	Zumo	240 ml/día	30	Mejora de la función de endotelial
Enfermedad cardiovascular	Zumo	-		Inhibición del desarrollo de lesiones ateroscleróticas debido a la del LDL contra la oxidación
Saludable	Zumo	-	98	Efecto antierogénicos en humanos
Hipertensos	Zumo	50 ml/día	14	Inhibición del efecto sobre el estrés oxidativo
Estenosis de la arteria carótida	Zumo	-	3 años	Descenso de la presión sanguínea sistólica
Saludables	Ac. Elágico	100-200 mg/día	28	La administración oral clareo la piel afectada por radiación UV
Cáncer	Zumo	-	28	Prevención de la activación procancerígena
Disfunción eréctil	Zumo	-	28	Sugiere que un mayor tiempo de tratamiento será efectivo

1.2 Concentración de zumos

Una de las soluciones que la industria ha obtenido a los problemas que tienen los zumos de frutas, que se han mencionado en el apartado 1, es el proceso industrial de concentración. La concentración de zumo es uno de los procesos, que como se ha expresado en anterioridad, se elimina del zumo gran parte del agua que contiene. Este proceso industrial tiene como finalidad los siguientes puntos:

- Reducir la actividad del agua en el zumo, para alargar la vida útil del producto.
- Minimizar el empaquetado, almacenamiento y el coste del transporte.
- Estabilizar o simplificar el manejo o tratamiento del zumo resultante del proceso.

Durante el proceso de concentración es muy importante conocer las condiciones de operación a las que se tiene que trabajar, al poder producir una alteración, empeorando las condiciones de sensibilidad y nutricionales del zumo concentrado, pudiendo aumentar los costes de producción.

En la industria se han realizado diferentes estudios para poder abordar este tipo de proceso por lo que se ha llegado a la conclusión que para poder concentrar los zumos se puede realizar de diferentes formas mencionadas seguidamente, entre otras, [10]:

- La evaporación
- La criocentración
- Concentración mediante filtración por membrana
- Tecnología de separación hidráulica

La evaporación es una de las operaciones que utiliza gran cantidad de energía, pero es por otro lado una de las que más concentrado puede estar el producto en comparación con los demás procesos de concentración. Debido a esto, en este trabajo se va a realizar la concentración de zumo de granada mediante la evaporación, por lo que seguidamente se va a extender en qué consiste y qué tipos de este proceso son más utilizados en la industria alimentaria.

1.2.1 Evaporación

La evaporación es la operación unitaria con la finalidad de separar parte de un disolvente de una disolución, quedando una pequeña porción de disolvente y soluto en la misma. Se utiliza para muchos objetivos, pero en este caso que nos ocupa se utiliza para la concentración de soluto en la disolución. Esta transferencia de materia se produce mediante la ebullición del disolvente, al ser este más volátil. En la mayoría de procesos en la industria esta ebullición se produce al aportar energía térmica, teniendo que tenerla en cuenta en el proceso.

1.2.1.1 Proceso de evaporación

La evaporación se produce cuando la presión de vapor de saturación y la presión externa en la superficie del agua son iguales. De manera que, dependiendo de la presión a que se encuentre el evaporador será la temperatura en que se evapore.

El calor necesario para evaporar el agua, denominado calor latente de vaporización, depende de la temperatura, de tal forma que este aporte de calor normalmente lo produce vapor sobrecalentado. Por ello, la cantidad de agua evaporada dependerá del flujo de vapor sobrecalentado.

En la evaporación se tienen que tener en cuenta diferentes factores que influyen en la velocidad de transferencia de calor y consecuentemente determinan los tiempos de procesado y la calidad del producto concentrado. Estos se enumeran seguidamente [11].

1.2.1.1.1 Diferencia de temperatura entre el vapor y el líquido a evaporar

La velocidad de transferencia de calor depende de la diferencia de temperaturas entre el vapor vivo y el líquido a evaporar. Esta diferencia se puede aumentar, aumentando la presión de vapor vivo o haciendo vacío en el evaporador lo que produce una reducción de la temperatura de ebullición del líquido a evaporar.

Al concentrarse se va reduciendo esta diferencia de temperatura, debido al aumento de la temperatura de ebullición del producto a evaporar. Pero en el rango en que se trabaja en los evaporadores industriales la regla de Dühring establece la relación entre la temperatura de ebullición de una solución y el punto de ebullición del agua pura a misma presión.

Esta elevación de punto de ebullición que se produce es importante en los productos que contienen concentraciones de solutos con bajo peso molecular [11].

1.2.1.1.2 Película limitante

Cuando parte del líquido que se encuentra en la superficie de transferencia de energía permanece en régimen estacionario, produce una resistencia, que reduce la transferencia de energía entre ambos fluidos. Puede ser reducido este efecto mediante el uso de corrientes convectivas en el interior de los alimentos o mediante turbulencias inducidas mecánicamente [11].

1.2.1.1.3 Depósitos en la superficie de transferencia de calor

Al cabo de un periodo de producción se pueden adsorber partículas en la superficie de transferencia de energía, reduciendo la transferencia. Estas incrustaciones dependerán de la diferencia de temperaturas, de la viscosidad y de la composición química del producto a evaporar. Este efecto se puede reducir reduciendo la diferencia de temperaturas, o en otro caso eliminando las partículas periódicamente.

La corrosión causada por el vapor de agua también puede producir una reducción de transferencia de energía, es por ello que se utilizan materiales anticorrosivos y en el caso que no se pueda se reduce mediante eliminación química [11].

1.2.1.2 Evaporador

El recipiente donde se produce la evaporación tiene el nombre de evaporador, también llamados intercambiadores, donde se intercambia el calor y la masa.

El intercambio de calor se produce normalmente en la industria sin que esté en contacto la disolución con el fluido o gas que le transfiere el calor, pero cabe destacar que también se utilizan con contacto directo de la disolución y el fluido. Para el caso en que no se tiene contacto, se investigó y normalmente se producen los intercambios mediante tubos o serpentines.

Industrialmente se diseñan los intercambiadores para que se produzca una evaporación continua, implicando un aumento en el área de intercambio de calor, aumento de intensidad de la ebullición y la transferencia de vapor rápida. Es por esto que se pueden producir impedimentos, según lo que se trabaje en el evaporador.

Para el correcto funcionamiento de la evaporación, el diseño debe de tener en cuenta los impedimentos que se demuestran seguidamente para reducir su aparición, con el fin de obtener un correcto funcionamiento.

- Formación de espuma
- Cristalización e incrustación en el evaporador
- Sensibilidad al calor de las disoluciones a tratar
- Corrosión presente en el evaporador
- Limitaciones de espacio para las cantidades deseadas

Debido a estos impedimentos se ha de utilizar diferentes evaporadores según el producto del proceso con el que se trabaje, adecuando cada evaporador particularmente a cada proceso.

Por otra parte, existe mucho interés en la velocidad de evaporación por lo que se tiene que tener en cuenta en el proceso, tratando de optimizar las siguientes características:

- Velocidad de transferencia de calor al líquido.
- Cantidad de calor necesaria para evaporar por kilogramo de masa.
- La temperatura máxima que permite el líquido a tratar para no modificar sus características físicas y químicas.
- La presión a la que se produce el proceso.
- Posibilidad de modificaciones en las propiedades del producto, causadas por las condiciones en las que se opera.

1.2.1.3 Evaporadores en la industria alimentaria

En la industria alimentaria se utilizan gran variedad de tipos de evaporadores, teniendo en común una elevada efectividad energética. Dentro de esta variedad se encuentran los expresados desde el apartado 1.2.1.3.1 hasta el 1.2.1.3.5, [10], [12]:

1.2.1.3.1 Evaporadores de recompresión térmica de vapor (TVR)

Utiliza una parte de vapor resultante para calentar el sistema mediante una bomba de chorro de vapor lo que produce una compresión del vapor, teniendo que tener una pequeña cantidad de vapor para poder funcionar llamado vapor motriz. Como bien se muestra en la Figura 3.

Estos son de gran eficiencia energética al reutilizar el vapor para calentar, en consecuencia, reducir los costes económicos. Cabe la posibilidad de aumentar los efectos en dos para poder reducir un tercio la cantidad de consumo de vapor.

En la puesta en práctica de este proceso es muy poco el vapor que se comprime en el termocompresor y el resto es condensado, aprovechando el calor.

En comparación con el evaporador de recompresión mecánica es más utilizado en sustancias con puntos de ebullición bajos y, en menor medida, con poca diferencia de temperatura en el evaporador, para reducir el rango de compresión.

La principal ventaja que tiene este evaporador es que se ahorra en cantidad de vapor teniendo un coste de inversión moderado, inferior comparado con añadir una etapa adicional de evaporación, [13].

Aun pudiendo ser utilizados en la concentración de zumos es más utilizado en la destilación y la desalinización de agua.

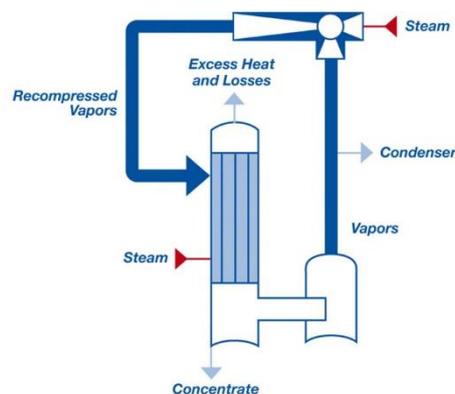


Figura 3. Evaporador de recompresión térmica de vapor (TVR) [13]

1.2.1.3.2 *Evaporador discontinuo*

Este evaporador consiste en un recipiente donde se alimenta hasta una determinada altura. Este recipiente contiene alrededor un intercambiador de calor que le aporta el calor necesario para producir la evaporación. Al producir la evaporación el vapor resultante es conducido al condensador que se condensa para su posterior utilización. Como bien muestra la Figura 4.

Es el más simple y por ello ha sido el más utilizado en la industria alimentaria. Al tener una transmisión de calor baja, tiene un tiempo de residencia del producto elevada, se reducen las cantidades que se pueden elaborar, junto a ser la alimentación discontinua se utilizan otros evaporadores en la industria.

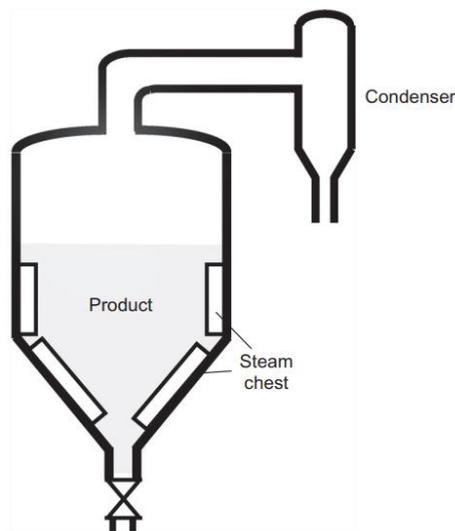


Figura 4. Evaporador discontinuo [14]

1.2.1.3.3 *Evaporador de película ascendente-descendente*

En este evaporador se alimenta en la parte inferior, asciende el alimento evaporándose hasta el alto del intercambiador, una vez alcanza la parte superior desciende y se separa el producto evaporado con el concentrado. El producto de esta evaporación es conducido a un separador que separa el vapor del concentrado y el vapor es dirigido hacia el condensador. Por otro lado, el líquido en ocasiones es recirculado para poder obtener la concentración deseada. Esto se demuestra gráficamente en la Figura 5.

Este evaporador produce una evaporación rápida por lo que es recomendable para el uso en zumos que no se puedan exponer a grandes cantidades de tiempo ni una elevada temperatura.

Uno de los problemas de este evaporador es que se producen bolsas o espacios en la película de producto que se encuentra en los tubos por lo que reduce en gran medida la eficacia del proceso.

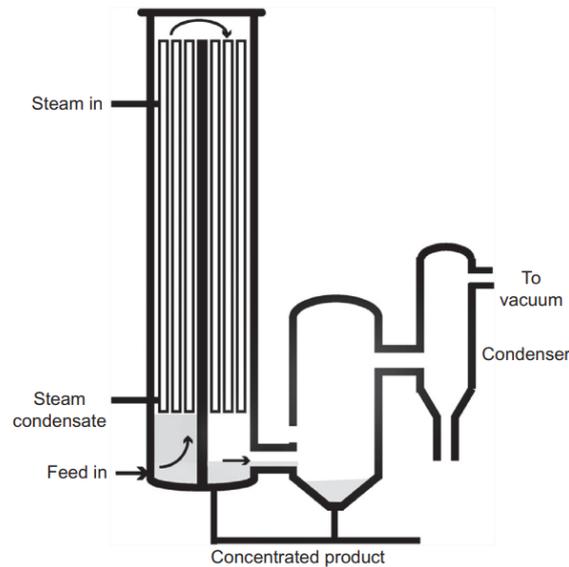


Figura 5. Evaporador de película ascendente-descendente [14]

1.2.1.3.4 *Evaporador térmico acelerado de corta duración (T.A.S.T.E)*

El haz de tubos es alimentado con jugo en forma de niebla turbulenta que produce una transferencia de calor mucho mayor alcanzando alrededor de 700 km/h en los tubos. Como bien se indica en la siguiente Figura 6.

Es un evaporador que es el más complejo que se utiliza para el tratamiento de zumos. Es uno de los que más se utiliza en la concentración de zumos donde no se encuentren grandes cantidades de pulpa o en zumos clarificados.

Ventajas de este evaporador:

- Calidad elevada del producto final
- Bajo costo de operación
- Baja inversión
- Bajo tiempo de residencia del producto,
- Fácil uso y mantenimiento
- Reducción de efectos térmicos adversos al producto
- Fiabilidad mecánica
- Tamaño compacto

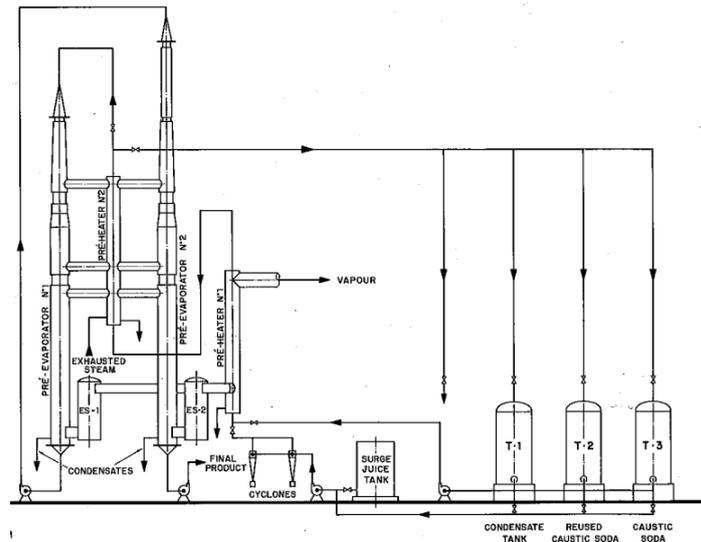


Figura 6. Evaporador térmico acelerado de corta duración (T.A.S.T.E) [15]

1.2.1.3.5 Evaporador multiefecto

Es el proceso que está compuesto por diferentes efectos ya que se reduce el consumo de vapor necesario al utilizar el vapor del efecto anterior para evaporar el producto, produciendo así un ahorro energético considerable. Esto se demuestra en la siguiente Figura 7.

La evaporación del producto se va realizando en cada efecto por lo que se reduce la presión del efecto que le sigue o se trabaja en grandes cantidades de área de superficie [11].

Estos evaporadores están diseñados para reducir la exposición térmica de los zumos de frutas, disminuyendo las posibilidades de variar las características bioquímicas del producto.

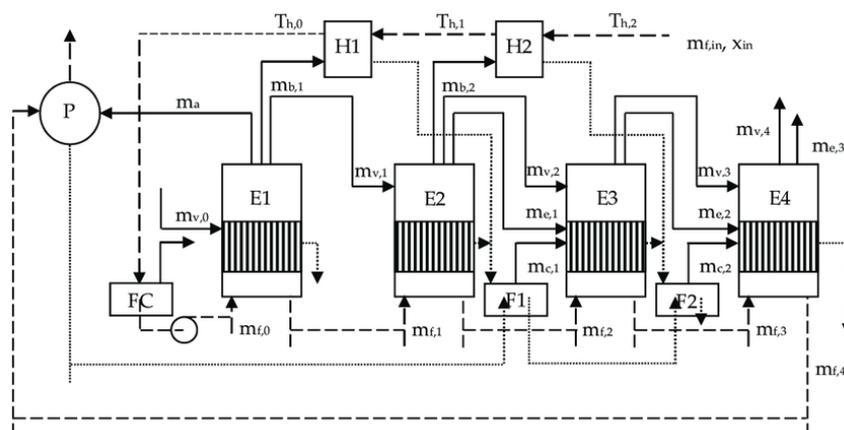


Figura 7. Evaporador Multiefecto [16]

2 Objetivos

2.1 Objetivo técnico

Técnicamente este trabajo tiene como objetivo obtener, mediante la tecnología de control de procesos, un modelo de control para controlar un proceso de evaporación para concentrar zumo de granada, pudiéndolo implementar en la industria. Para ello, se obtendrá el modelo del evaporador y se le aplicarán las técnicas de control adecuadas.

2.2 Objetivo académico

Como objetivo académico de este presente trabajo se quiere obtener el título de Grado en Ingeniería Química, ya que se necesitan los créditos necesarios para obtenerlo. Aunando gran parte de las competencias transversales adquiridas en el grado. Como son:

- Análisis y resolución de problemas.
- Diseño y proyecto.
- Trabajo en equipo y liderazgo
- Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
- Pensamiento crítico
- Aprendizaje permanente
- Planificación y gestión del tiempo
- Instrumentales específicas.

2.3 Objetivos de desarrollo sostenible

Con respecto a los objetivos de desarrollo sostenible respecto a este trabajo final de grado cabe destacar que se encuentran varios puntos de estos objetivos involucrados, enumerándose en la Figura 8:



Figura 8. ODS del trabajo [17]

3. Salud y bienestar, este zumo de granada se demuestra que tiene gran obtención de beneficios humanos para la salud y el bien estar, pudiendo reducir la exposición al cáncer en el ser humano.

4. Educación de calidad, este es un trabajo donde se encuentran varios aspectos de la educación técnica, profesional y superior, proporcionándola públicamente, al abastecimiento de todo el mundo.

6. Agua limpia y saneamiento, en este trabajo se obtiene agua, pudiendo tener posteriormente distintos usos.

9. Industria, innovación e infraestructura, en este trabajo se innova para poder obtener una mayor calidad de producción del producto, y en consecuencia aumentar la calidad del producto final.

3 Proceso

3.1 Descripción del proceso

El proceso de evaporación consiste en la separación de parte del agua que contiene el zumo de granada, con la finalidad de concentrar la disolución de zumo reduciendo así el volumen. Esto conlleva una reducción del espacio de almacenaje y transporte implicando una reducción de los costes del proceso.

Dicha separación se produce mediante un intercambio de calor producido por una corriente de vapor vivo, el cual transfiere el calor a la disolución. Al producirse esta transferencia el vapor vivo se condensa, al perder calor, y la disolución obtiene calor produciendo la ebullición al ser más volátil el agua que la solución a concentrar.

Debido a estudios realizados para la industria, se ha demostrado que con la finalidad de reducir las pérdidas de calor se utiliza una configuración en serie de los evaporadores, aumentando así la eficacia alcanzando el deseo industrial de este proceso, lo que se le llama evaporador multiefecto.

Se recolecta cada condensación de vapor vivo en un tanque, el vapor que produce la evaporación se utiliza para los siguientes evaporadores, tratándolo con anterioridad a su utilización en el evaporador debido a que debe de tener unas características adecuadas que no siempre se alcanzan. En el último intercambiador el vapor de la evaporación se envía a un condensador para poder condensarlo y enviarlo al tanque del agua condensada del vapor vivo.

3.2 Introducción al proceso a modelar

Para poder resolver el problema sin tener tanta complejidad, como sería el trabajar en el proceso completo de evaporación multiefecto, siendo esta la configuración más adecuada para la evaporación de zumo de granada, se ha simplificado el proceso deduciendo que el evaporador trabaja como si fuera un evaporador de un solo estanque con aporte de calor mediante un serpentín, reduciendo así la dificultad de evaluar el proceso. Pero para simplificarlo aún más solo se trabajará teniendo en cuenta el intercambiador de calor, aun considerando que tiene un condensador a la salida del vapor evaporado.

El evaporador es alimentado con zumo de granada que es la corriente F, el aporte de calor es producido por vapor vivo que es la corriente VE. Al transferir el calor de vapor vivo al zumo de granada se produce la evaporación y el flujo masico de vapor \dot{m}_s es el que se evapora, seguidamente este vapor es extraído del evaporador mediante el flujo másico de la corriente S₂ conduciéndolo al condensador que es refrigerado mediante agua a temperatura ambiente que se encuentra en la corriente RW. Por otro lado, el concentrado es extraído del evaporador por la corriente E. Esto se encuentra especificado en la Figura 9.

3.3 Consideraciones a tener en cuenta

Las consideraciones que se han tenido en cuenta en el inicio de la deducción del modelo dinámico del proceso son las siguientes:

- Composición y temperatura homogénea en el evaporador.
- Equilibrio termodinámico l-v.
- La variación de flujo másico entre la evaporación que se produce \dot{m}_s y la salida del vapor producido \dot{m}_{S2} es la misma.
- La presión del evaporador será constante, suponiendo que está perfectamente controlado por un sistema de control.

3.4 Condiciones de operación del proceso

- Concentración de la alimentación W_F : se toma como concentración inicial 14 °Brix, estimado al tener en cuenta que la composición del zumo de granada predomina la glucosa con alrededor de 7 °Brix junto con la fructosa con la misma concentración, como se puede comprobar en la Tabla 4, [9].
- Temperatura de alimentación T_F : es de 298,15 K, al considerar que la alimentación se encuentra a temperatura ambiente.
- Concentración a la salida del evaporador W_E : el valor deseado para la concentración final del producto es de 55 °Brix.
- Presión del vapor vivo P_{VV} : la presión a la que está sometida el vapor vivo es de 120 kPa. Al tener que ser mayor que la presión atmosférica, [9].
- Presión en el evaporador P: la presión que se encuentra en el evaporador es de 45 kPa. Que es debido a que el proceso debe tener una presión más baja que la atmosférica para poder aumentar la diferencia de temperaturas entre el vapor vivo y el punto de ebullición de zumo de granada. También al no poder alcanzar una temperatura mayor de 90 °C que modificaría la composición química del producto, dejando varios grados centígrados de margen por si existe alguna alteración.

- Temperatura del agua de refrigeración a la entrada del condensador T_{RWE} : su valor es de 25 °C.
- Temperatura del agua de refrigeración a la salida del condensador T_{RWS} : su valor es de 35 °C.
- Flujo másico de zumo concentrado a la salida del evaporador \dot{m}_E : es de valor 0,2 kg/s. ya que es la cantidad de concentrado deseado.
- Volumen que contiene el líquido dentro del evaporador V_l siendo este de un valor de 0,2474 m³, [9].
- Área del volumen de control VC, A: 0,1963 m² al tener un radio de 0,25 m, [9].

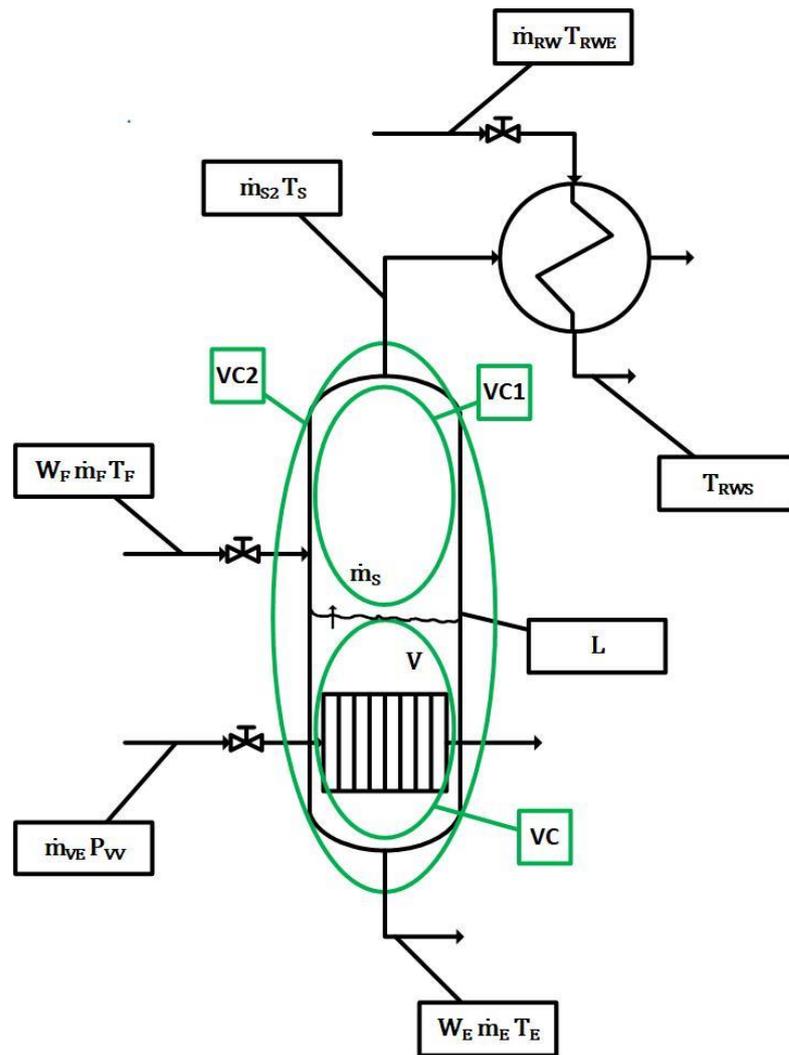


Figura 9. Intercambiador de calor

3.5 Modelo dinámico

Para poder controlar un proceso se tiene que conocer cómo funciona dinámicamente, por lo que, se tiene que obtener el comportamiento dinámico. Este comportamiento dinámico se le denomina modelo dinámico del proceso, el cual, es la descripción matemática de las diferentes variables involucradas en el proceso y la relación que tienen entre ellas.

Los diferentes tipos de modelos matemáticos que se pueden utilizar se expresan en la siguiente Figura 10. En esta se identifican los modelos utilizados para este trabajo marcándolos de color.

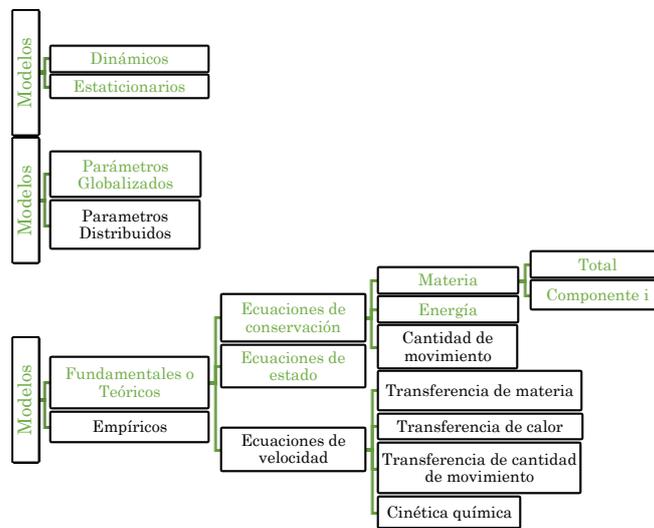


Figura 10. Diferentes tipos de modelos matemáticos

3.5.1 Balance de materia total

Al aplicarle la ley de conservación de masa total para parámetros globalizados al volumen de control VC de nuestro proceso, da como resultado esta ecuación (E 1) que se muestra seguidamente. Siendo dm/dt la variación de masa con respecto al tiempo que se encuentra en el volumen de control VC, \dot{m}_F siendo el flujo másico de alimentación, \dot{m}_E el flujo másico de concentrado y \dot{m}_S el flujo másico de vapor evaporado.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S \quad (\text{E 1})$$

Al sustituir la variación de masa dm/dt para que salga la variación de nivel de zumo respecto al tiempo dL/dt , como bien se muestra en la igualdad (E 2) da como resultado la siguiente ecuación (E 3). Siendo A el área del volumen de control VC, $d\rho_{z,E}/dT_E$ la variación de densidad de zumo de granada respecto a la temperatura del zumo de granada T_E , V el volumen del volumen de control VC y L el nivel de zumo de granada en el evaporador.

$$\begin{aligned}\frac{dm}{dt} &= \frac{d(\rho_{z,E} \cdot V)}{dt} = V \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dt} + \rho_{z,E} \cdot \frac{dV}{dt} = V \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dT_E} \cdot \frac{dT_E}{dt} + \rho_{z,E} \cdot \frac{dV}{dt} \\ &= V \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dT_E} \cdot \frac{dT_E}{dt} + \rho_{z,E} \cdot A \cdot \frac{dL}{dt}\end{aligned}\quad (\text{E } 2)$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S - A \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dT_E} \cdot \frac{dT_E}{dt} \cdot L}{A \cdot \rho_{z,E}} \quad (\text{E } 3)$$

3.5.2 Balance de materia por componentes

Seguidamente al balance de materia total se aplica la ley de conservación de masa para parámetros globalizados para el componente de nuestro volumen de control VC, siendo la suma de las concentraciones de glucosa y fructosa, da la siguiente ecuación (E 4). Al ser W_E la concentración de zumo concentrado y W_F concentración de zumo en la alimentación.

$$\frac{d(m \cdot W_E)}{dt} = \dot{m}_F \cdot W_F - \dot{m}_E \cdot W_E \quad (\text{E } 4)$$

Separando los términos que dependen del tiempo m y W_E , de la parte diferencial de la ecuación (E 4) da como resultado la ecuación (E 5).

$$m \frac{dW_E}{dt} + W_E \frac{dm}{dt} = \dot{m}_F \cdot W_F - \dot{m}_E \cdot W_E \quad (\text{E } 5)$$

Sustituyendo el balance de materia global (E 1) en la ecuación (E 5) y dejándola simplificada da como resultado la siguiente ecuación (E 8) mediante un proceso intermedio que es el que muestran las ecuaciones (E 6) y (E 7).

$$m \frac{dW_E}{dt} + W_E \cdot \dot{m}_F - W_E \cdot \dot{m}_E - W_E \cdot \dot{m}_S = \dot{m}_F \cdot W_F - \dot{m}_E \cdot W_E \quad (\text{E } 6)$$

$$m \frac{dW_E}{dt} = \dot{m}_F \cdot W_F - W_E \cdot \dot{m}_F + W_E \cdot \dot{m}_E - \dot{m}_E \cdot W_E + W_E \cdot \dot{m}_S \quad (\text{E } 7)$$

$$m \frac{dW_E}{dt} = \dot{m}_F \cdot (W_F - W_E) + \dot{m}_S \cdot W_E \quad (\text{E } 8)$$

Al pasar la masa m a la otra parte de la igualdad dentro de la ecuación (E 8), se deja la variación de concentración de zumo de granada respecto al tiempo dW_E/dt , dando como resultado la ecuación (E 9).

$$\frac{dW_E}{dt} = \frac{(\dot{m}_F \cdot (W_F - W_E) + W_E \cdot \dot{m}_S)}{m} \quad (\text{E } 9)$$

3.5.3 Balance de energía

Por otro lado, al aplicar la ley de conservación de la energía para parámetros globalizados al volumen de control VC da como resultado la ecuación (E 10). Siendo $h_F(T_F)$ la entalpía del zumo de granada en la alimentación, $h_E(T_E)$ la entalpía de zumo de granada concentrado, $h_S(T_E)$ la entalpía de vapor de agua evaporado y Q el calor aportado por el vapor vivo.

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_F \cdot h_F - \dot{m}_E \cdot h_E - \dot{m}_S \cdot h_S + Q \quad (\text{E } 10)$$

Dividiendo la ecuación (E 10) en tres partes, para poder desarrollar cada una de ellas, tenemos las siguientes igualdades (E 11), (E 12) y (E 13).

En la igualdad (E 10) al ser un líquido se asume que la energía interna específica del zumo u_E es igual a la entalpía de este h_E . Por otro lado, se utiliza la regla de la cadena para poder expresar la entalpía respecto a la temperatura $\partial h_E/\partial T_E$ y respecto a la concentración $\partial h_E/\partial W_E$ para posteriormente sustituirlas con ecuaciones conocidas. También se utiliza la regla de la cadena en la variación de masa respecto a la temperatura. Quedando como resultado la ecuación (E 11).

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{d(m \cdot u_E)}{dt} = m \cdot \frac{du_E}{dt} + u_E \cdot \frac{dm}{dt} \approx m \cdot \frac{dh_E}{dt} + h_E \cdot \frac{dm}{dt} = \\ &= m \cdot \left(\frac{\partial h_E}{\partial T_E} \cdot \frac{\partial T_E}{\partial t} + \frac{\partial h_E}{\partial W_E} \cdot \frac{\partial W_E}{\partial t} \right) + h_E \cdot \frac{dm}{dt} \end{aligned} \quad (\text{E } 11)$$

En la ecuación (E 12) se expresa Q según el calor latente de vaporización λ_{VE} y el flujo másico \dot{m}_{VE} .

$$Q = UA(T_{VE} - T_E) = \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE} \quad (\text{E } 12)$$

Sustituyendo el balance de materia total en la ecuación (E 11) resulta la siguiente igualdad (E 13).

$$h_E \cdot \frac{dm}{dt} = h_E \cdot (\dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S) = h_E \cdot \dot{m}_F - h_E \cdot \dot{m}_E - h_E \cdot \dot{m}_S \quad (\text{E } 13)$$

Sustituyendo las ecuaciones (E 12) y (E 13) en la ecuación (E 10) y dejando la variación de la temperatura respecto al tiempo resulta la ecuación (E 16), siendo esta la definitiva del balance de energía para el volumen de control VC.

$$m \cdot \left(\frac{\partial h_E}{\partial T_E} \cdot \frac{\partial T_E}{\partial t} + \frac{\partial h_E}{\partial W_E} \frac{\partial W_E}{\partial t} \right) + h_E \cdot \dot{m}_F - h_E \cdot \dot{m}_E - h_E \cdot \dot{m}_S \\ = \dot{m}_F \cdot h_F - \dot{m}_E \cdot h_E - \dot{m}_S \cdot h_S + \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE} \quad (\text{E } 14)$$

$$m \cdot \left(\frac{\partial h_E}{\partial T_E} \cdot \frac{\partial T_E}{\partial t} + \frac{\partial h_E}{\partial W_E} \frac{\partial W_E}{\partial t} \right) = \dot{m}_F \cdot (h_F - h_E) + \dot{m}_S \cdot (h_E - h_S) + \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE} \quad (\text{E } 15)$$

$$\frac{\partial T_E}{\partial t} = \frac{\dot{m}_F \cdot (h_F - h_E) + \dot{m}_S \cdot (h_E - h_S) + \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE}}{m} - \frac{\frac{\partial h_E}{\partial W_E} \cdot \frac{\partial W_E}{\partial t}}{\frac{\partial h_E}{\partial T_E}} \quad (\text{E } 16)$$

Aun teniendo todas las ecuaciones que se han mencionado anteriormente se debe de introducir una suposición adicional la cual relaciona la concentración de zumo W_E , con la Temperatura del zumo concentrado T_E , como bien muestra la ecuación (E 17) [18]. Al conocer que T_{satE} es la temperatura de saturación del zumo de granada.

$$T_E = T_{satE} + K_1 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100} \quad (\text{E } 17)$$

Teniendo esta ecuación (E 17) se le aplica la derivada respecto a la concentración del zumo W_E , dando como resultado la ecuación (E 18).

$$\frac{dT_E}{dW_E} = K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100} \quad (\text{E } 18)$$

Pasando la variación de concentración de zumo a la otra parte de la igualdad de la ecuación (E 18) y dividiendo las dos partes por la variación del tiempo da como resultado la ecuación (E 19).

$$\frac{dT_E}{dt} = K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100} \cdot \frac{dW_E}{dt} \quad (\text{E 19})$$

De esta ecuación anterior (E 19) se despeja dejando a un lado de la igualdad la variación de concentración con respecto al tiempo, por lo que queda la ecuación (E 20).

$$\frac{\frac{dT_E}{dt}}{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}} = \frac{dW_E}{dt} \quad (\text{E 20})$$

Al tener esta ecuación (E 20) se ha sustituido la variación de concentración respecto al tiempo en la ecuación (E 9), del balance de materia, y da como resultado la ecuación (E 21).

$$\frac{\frac{dT_E}{dt}}{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}} = \frac{\dot{m}_F \cdot (W_F - W_E) + W_E \cdot \dot{m}_S}{m} \quad (\text{E 21})$$

Al despejar \dot{m}_S de la anterior ecuación (E 21) da como resultado la ecuación (E 22), como se muestra seguidamente, pudiendo así poder obtenerse.

$$\dot{m}_S = \frac{\frac{dT_E}{dt} \cdot m}{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100} + \dot{m}_F \cdot (W_E - W_F)} \quad (\text{E 22})$$

Por otro lado, se tiene una relación entre el flujo de agua de refrigeración de entrada del condensador \dot{m}_{RW} y el flujo de salida de vapor del evaporador \dot{m}_S como se muestra en la ecuación (E 23).

$$\frac{\dot{m}_{RW}}{\dot{m}_S} = \frac{h_S - h_{RWS}}{h_{RWS} - h_{RWE}} \quad (\text{E 23})$$

Un breve resumen de las ecuaciones que son las importantes para este proceso se expresa en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9. Ecuaciones del proceso

$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S$	(E 1)
$\frac{dL}{dt} = \frac{\dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S - A \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dT_E} \cdot \frac{dT_E}{dt} \cdot L}{A \cdot \rho_{z,E}}$	(E 3)
$\frac{dW_E}{dt} = \frac{(\dot{m}_F \cdot (W_F - W_E) + W_E \cdot \dot{m}_S)}{m}$	(E 9)
$\frac{\partial T_E}{\partial t} = \frac{\dot{m}_F \cdot (h_F - h_E) + \dot{m}_S \cdot (h_E - h_S) + \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE} - \frac{\partial h_E}{\partial W_E} \cdot \frac{\partial W_E}{\partial t}}{\frac{\partial h_E}{\partial T_E}}$	(E 16)
$T_E = T_{satE} + K_1 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}$	(E 17)
$\frac{\frac{dT_E}{dt}}{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}} = \frac{dW_E}{dt}$	(E 20)
$\dot{m}_S = \frac{\frac{dT_E}{dt} \cdot m}{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}} + \dot{m}_F \cdot (W_E - W_F)$	(E 22)

3.6 Correlaciones necesarias para el proceso

Para poder resolver la dinámica del proceso se necesita de la obtención de correlaciones entre diversas variables, obteniéndose de diferentes maneras como se expresa seguidamente, que son las necesarias para este proceso.

- Función de la entalpía de la disolución de zumo de granada con respecto a la temperatura y la concentración, h (T,W): se produce una interpolación doble en Matlab de los datos de jugo de caña [19]. Teniendo todos los datos en el apartado 8.1 del presente trabajo. Las unidades son kJ/kg, la temperatura en K y la concentración en °Brix.

- Temperatura de saturación del agua en $T_{w,sat}(P)$: mediante los datos que se obtienen en The Engineering Toolbox, [20], mostrados en el apartado 0, se le aplica una interpolación a la presión y la temperatura de saturación del agua mediante Matlab. Las unidades son °C y la presión en kPa.
- Función de la elevación de punto de ebullición con respecto a la concentración EPB(W): a presión constante existe una variación de temperatura de ebullición del agua y el punto de ebullición de la disolución de zumo lo cual depende de la concentración de zumo por lo que se utilizara la ecuación (E 24) [18], en los anexos se especifican los valores numéricos correspondientes. Las unidades son la concentración en fracción másica y EPB en grados Kelvin.

$$EPB(W) = K_1 \cdot e^{K_2 \cdot W \cdot 100} \quad (\text{E 24})$$

- Calor latente de vaporización del agua $H_{latente}(T)$: a partir de los datos obtenidos en The Engineering Toolbox [20], encontrándose en el apartado 8.3 y mediante ajuste polinómico se obtiene la ecuación (E 25). Las unidades son kJ/kg y la temperatura es en K.

$$H_{latente}(T) = K_3 \cdot T^4 + K_4 \cdot T^3 + K_5 \cdot T^2 + K_6 \cdot T + K_7 \quad (\text{E 25})$$

- Entalpía del agua líquida $H_{w,l}(T)$: es la que representa la siguiente ecuación (E 26), obteniéndose mediante ajuste polinómico de los datos obtenidos en The Engineering Toolbox [20], encontrándose en el apartado 8.4. Las unidades están en kJ/kg y la temperatura en K.

$$H_{w,l}(T) = K_8 \cdot T^5 + K_9 \cdot T^4 + K_{10} \cdot T^3 + K_{11} \cdot T^2 + K_{12} \cdot T + K_{13} \quad (\text{E 26})$$

- Entalpía de vapor de agua saturado $H_{w,g}(T)$: para obtener la entalpía de vapor de agua saturado se han utilizado la entalpía de agua líquida junto con el calor latente de vaporización del agua dando en consecuencia la ecuación (E 27).Las unidades están en kJ/kg y la temperatura en K.

$$H_{w,g}(T) = H_{latente}(T) + H_{w,l}(T) \quad (\text{E 27})$$

- Densidad de la glucosa $\rho_{gluc}(T)$: la ecuación que relaciona la densidad de la glucosa con respecto a la temperatura se expresa en la (E 28). Las unidades en las que están son la temperatura en Kelvin y la densidad en kg/m^3 . Esta ecuación se ha obtenido a partir de datos obtenidos en el programa Promax en el cual se ha utilizado el paquete termodinámico TK Wilson-PR considerando que la corriente tenía glucosa. Los datos que se han obtenido se presentan en el apartado 8.5.

$$\rho_{gluc}(T) = K_{14} \cdot T^2 + K_{15} \cdot T + K_{16} \quad (E 28)$$

- Densidad de la fructosa $\rho_{fruct}(T)$: la ecuación que relaciona la densidad de la fructosa con respecto a la temperatura se expresa en la (E 29). Las unidades en las que están son la temperatura en K y la densidad en kg/m^3 . Esta ecuación se ha obtenido a partir de datos obtenidos en el programa Promax en el cual se ha utilizado el paquete termodinámico TK Wilson-PR considerando que la corriente tenía fructosa. Los datos que se han obtenido se presentan en el apartado 8.5.

$$\rho_{fruct}(T) = K_{17} \cdot T^2 + K_{18} \cdot T + K_{19} \quad (E 29)$$

- Densidad del agua líquida $\rho_{w,l}(T)$: la ecuación que relaciona la densidad del agua con respecto a la temperatura se expresa en (E 30). Las unidades en las que están son la temperatura en K y la densidad en kg/m^3 . La ecuación se ha realizado mediante regresión lineal de los datos obtenidos de Promax en el cual se ha utilizado el paquete termodinámico TK Wilson-PR considerando que la corriente tenía agua líquida. Los datos que se han obtenido se presentan en el apartado 8.5.

$$\rho_{w,l}(T) = K_{20} \cdot T^2 + K_{21} \cdot T + K_{22} \quad (E 30)$$

- Densidad del zumo de granada $\rho_z(W, T)$: se puede determinar la densidad del zumo mediante la siguiente relación que se expresa en la (E 31), al considerar que el zumo de granada está compuesto por fructosa, glucosa y agua. Las unidades de la densidad son kg/m^3 . Esta ecuación se expresa en el apartado 8.6 más detalladamente de donde proviene esta deducción.

$$\rho_z(W, T) = \frac{1}{\frac{\frac{W}{2}}{\rho_{fruct}(T)} + \frac{\frac{W}{2}}{\rho_{gluc}(T)} + \frac{1-W}{\rho_{w,l}(T)}} \quad (E 31)$$

- Variación de la entalpía del zumo respecto a la temperatura $\partial h_z / \partial T$: esta ecuación (E 32), proviene de una regresión lineal a partir de los datos de la Tabla 21, que se encuentra en el Anexo 8.1 proveniente de la calculadora llamada Bubnik, Kadlec, Urban & Bruhns [19]. Esta ecuación proviene de un desarrollo matemático que se indica en el apartado 8.7 del presente trabajo. Las unidades están en kJ/kg y la temperatura en K

$$\frac{\partial h_z}{\partial T} = K_{23} + K_{24} \cdot W_E + (K_{25} + K_{26} \cdot W_E) \cdot T \quad (\text{E } 32)$$

- Variación de la entalpía del zumo respecto a la concentración de zumo $\partial h_z / \partial W$: esta variación se expresa en la siguiente ecuación (E 33), que se deduce de una regresión lineal a partir de los datos de la Tabla 21, expresada en el apartado 8.1 de este trabajo, que se obtiene de la calculadora llamada Bubnik, Kadlec, Urban & Bruhns [19]. Esta ecuación proviene del desarrollo matemático expresado en el apartado 8.7. Las unidades están en kJ/kg, la concentración en °Brix y la temperatura en K.

$$\frac{\partial h_z}{\partial W} = K_{27} \cdot T + K_{28} \cdot T^2 \quad (\text{E } 33)$$

- Calor específico del agua a volumen constante $\overline{C}_{PV}(T_{w,sat}, T)$: se le aplica la integral a los valores de calores específicos [21], dividida por la variación de temperaturas como muestra la ecuación (E 34). Las unidades son kJ/kg K y para las temperaturas en K. Los valores de calor específico se muestran en la Tabla 27 del apartado 8.9.

$$\overline{C}_{PV}(T_{sat}, T) = \frac{\int_{T_{sat}}^T C_{PV} \cdot dT}{T - T_{sat}} \quad (\text{E } 34)$$

- Entalpía de vapor de agua sobrecalentado $H_{w,g,sc}(T, W)$: es la suma de la entalpía de vapor de agua saturado y el producto del calor específico del agua a volumen constante junto con la elevación de punto de ebullición como bien se muestra en la siguiente ecuación (E 35). Las unidades son kJ/kg K, la concentración en °Brix y la temperatura en K.

$$H_{w,g,sc}(T, W) = H_{w,g}(T) + \overline{C}_{PV}(T_{sat}, T) \cdot EPB(W) \quad (\text{E } 35)$$

- La masa del volumen de control VC m se indica en la ecuación siguiente que es el producto entre la densidad y el volumen de zumo de granada. Depende de la concentración W_E y de la temperatura T_E como bien muestra la ecuación (E 36). Las unidades son en kg, el volumen en m^3 , la concentración en °Brix y la densidad en kg/m^3 .

$$m = \rho_z \cdot V = \frac{V}{\frac{\frac{W_E}{2}}{\rho_{fruct}} + \frac{\frac{W_E}{2}}{\rho_{gluc}} + \frac{1 - W_E}{\rho_{agua}}} \quad (E\ 36)$$

Seguidamente en la siguiente Tabla 10 se muestran las variables del proceso que no se han definido en anterioridad ya que utilizan correlaciones que se han explicado en este apartado 3.6.

Tabla 10. Variables mediante correlaciones

Variable	Obtención
T_{satE}	$T_{satE} = T_{w,sat}(P)$
T_{VE}	$T_{VE} = T_{w,sat}(P_{VV})$
h_F	$h_F = h(T_F, W_F)$
h_E	$h_E = h(T_E, W_E)$
λ_{VE}	$\lambda_{VE} = H_{latente}(T_{VE})$
h_{RWE}	$h_{RWE} = H_{w,l}(T_{RWE})$
h_{RWS}	$h_{RWS} = H_{w,l}(T_{RWS})$
$\rho_{z,F}$	$\rho_{z,F} = \rho_z(T_F, W_F)$
$\rho_{z,E}$	$\rho_{z,E} = \rho_z(T_E, W_E)$

3.7 Régimen nominal de operación

Cada balance que anteriormente se ha expresado se puede obtener el régimen nominal de operación, anulando las derivadas parciales, dando como resultado las ecuaciones (E 37), (E 38) y (E 39).

La ecuación (E 37) representa el balance de masa global en régimen permanente.

$$0 = \overline{\dot{m}}_F - \overline{\dot{m}}_E - \overline{\dot{m}}_S \quad (\text{E 37})$$

La ecuación (E 38) representa la ecuación del balance de masa por componente en régimen permanente.

$$0 = (\overline{\dot{m}}_F \cdot (\overline{W}_F - \overline{W}_E) + \overline{W}_E \cdot \overline{\dot{m}}_S) \quad (\text{E 38})$$

La ecuación (E 39) representa la ecuación del balance de energía en régimen permanente.

$$0 = \overline{\dot{m}}_F \cdot (\overline{h}_F - \overline{h}_E) + \overline{\dot{m}}_S \cdot (\overline{h}_E - \overline{h}_S) + \overline{\dot{m}}_{VE} \cdot \overline{\lambda}_{VE} \quad (\text{E 39})$$

3.8 Simulación dinámica del proceso

Al tener por completo el modelo matemático dinámico que se encuentra en el apartado 3.5 se procede a la obtención de la simulación dinámica del proceso para saber su comportamiento. Para ello se tiene que introducir las ecuaciones diferenciales, ecuaciones adicionales y valores iniciales necesarios en el programa Matlab. Para poder simular se utiliza tanto el Matlab como la herramienta de Simulink.

En Matlab se introduce lo que se muestra en la siguiente Tabla 11:

Tabla 11. Variables

Variables de entrada		Variables de salida	
Nombre	Unid	Nombre	Unid
W_F	Brix/100	W_E	Brix/100
T_F	K	T_E	K
P_{VV}	kPa	L	m
P	kPa	\dot{m}_S	kg/s
T_{RWE}	K	\dot{m}_{RW}	kg/s
T_{RWS}	K	m	kg
\dot{m}_F	kg/s		
\dot{m}_{VE}	kg/s		
W_E	Brix/100		
\dot{m}_E	kg/s		

Para poder calcular cada una de las variables de salida se han utilizado las distintas ecuaciones que se han obtenido anteriormente en los apartados 3.5 y 3.6 como bien se muestra en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12. Ecuaciones utilizadas en la simulación dinámica

Variable	Ecuación	Número Ecuación
W_E	$\frac{dW_E}{dt} = \frac{(\dot{m}_F \cdot (W_F - W_E) + W_E \cdot \dot{m}_S)}{m}$	(E 9)
T_E	$\frac{\partial T_E}{\partial t} = \frac{\dot{m}_F \cdot (h_F - h_E) + \dot{m}_S \cdot (h_E - h_S) + \dot{m}_{VE} \cdot \lambda_{VE} - \frac{\partial h_E}{\partial W_E} \cdot \frac{\partial W_E}{\partial t}}{\frac{\partial h_E}{\partial T_E}}$	(E 16)
L	$\frac{dL}{dt} = \frac{\dot{m}_F - \dot{m}_E - \dot{m}_S - A \cdot \frac{d\rho_{z,E}}{dT_E} \cdot \frac{dT_E}{dt} \cdot L}{A \cdot \rho_{z,E}}$	(E 3)
\dot{m}_S	$\dot{m}_S = \frac{\frac{dT_E}{dt} \cdot m}{\frac{K_1 \cdot K_2 \cdot 100 \cdot e^{K_2 \cdot W_E \cdot 100}}{W_E} + \dot{m}_F \cdot (W_E - W_F)}$	(E 22)
\dot{m}_{RW}	$\frac{\dot{m}_{RW}}{\dot{m}_S} = \frac{h_S - h_{RWS}}{h_{RWS} - h_{RWE}}$	(E 23)
m	$m = \rho_z \cdot V = \frac{\frac{W_E}{2}}{\rho_{fruct}} + \frac{\frac{W_E}{2}}{\rho_{gluc}} + \frac{1 - W_E}{\rho_{agua}}$	(E 36)

Los datos que se introducen en el programa de Matlab son los que se encuentran en la siguiente Tabla 13, siendo los datos en régimen nominal de operación que se han obtenido, como se demuestra en la siguiente Tabla 14.

Como bien se muestra en la Tabla 13 cada variable tiene un rango de operación que se ha obtenido a partir de las variables de entrada y posteriormente simular en todos los posibles casos mínimos y máximos de cada variable, obteniendo el rango mínimo y máximo de las variables del proceso.

Al tener todas las ecuaciones que definen el proceso junto a las variables de entrada y salida se puede formar el programa en Simulink el cual puede realiza la simulación del proceso de evaporación de zumo de granada. Una representación de lo que se ha obtenido en el programa es la que expresa la siguiente Figura 11.

Seguidamente al tener el programa se le añade todo lo obtenido en los anteriores apartados en el programa Matlab utilizando simultáneamente Matlab y Simulink para poder obtener la simulación dinámica del proceso. Dando una simulación dinámica que se encuentra en régimen nominal de operación como indica la Figura 12, debido a que no se experimenta ningún cambio en la entrada. Esta Figura 12 es una comprobación de que el proceso de Simulink funciona correctamente.

Tabla 13. Datos iniciales

Nombre	Valor	Rango de Operación	Unid
\overline{W}_F	0,14	0,12-0,16	Brix/100
\overline{W}_E	0,55	0,4305-0,6538	Brix/100
\overline{m}_F	0,7857	0,4036-1,3621	kg/s
\overline{m}_{VE}	0,6847	0,2994-1,3002	kg/s
\overline{m}_E	0,2	0,1-0,3	kg/s
\overline{m}_S	0,5857	0,2536-1,1121	kg/s
\overline{T}_{RWE}	298,15	-	K
\overline{T}_{RWS}	308,15	-	K
\overline{T}_E	356,45	354,15-360,15	K
\overline{T}_F	298,15	295,15-301,15	K
\overline{P}_{VV}	120	119-121	kPa
\overline{P}	45	-	kPa
\overline{L}	1,2601	0,9601-1,2601	m

Tabla 14. Propiedades en R.N. de operación

$\overline{\rho}_{z,F}(W_F, T_F) = \frac{1}{\frac{\overline{W}_F}{2} \cdot \frac{1}{\rho_{fruct}(T_F)} + \frac{\overline{W}_F}{2} \cdot \frac{1}{\rho_{gluc}(T_F)} + \frac{1 - \overline{W}_F}{\rho_{w,l}(T_F)}} = 1.049,6 \text{ kg/m}^3$
$\overline{h}_F(\overline{T}_F, \overline{W}_F) = h(\overline{W}_F, \overline{T}_F) = 98,57 \text{ kJ/kg}$
$\overline{h}_E(\overline{T}_E, \overline{W}_E) = h(\overline{W}_E, \overline{T}_E) = 248,73 \text{ kJ/kg}$
$\overline{\lambda}_{VE}(\overline{T}_{VE}) = K_3 \cdot \overline{T}_{VE}^4 + K_4 \cdot \overline{T}_{VE}^3 + K_5 \cdot \overline{T}_{VE}^2 + K_6 \cdot \overline{T}_{VE} + K_7 = 2222,8 \text{ kJ/kg}$
$\overline{m}_F = \frac{\overline{m}_E \cdot \overline{W}_E}{\overline{W}_F} = 0,7857 \text{ kg/s}$
$\overline{m}_S = \overline{m}_F - \overline{m}_E = 0,5857 \text{ kg/s}$
$\overline{T}_E(\overline{W}_E) = T_{satE} + K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \overline{W}_E \cdot 100} = 356,45 \text{ K}$
$\overline{C}_{PV}(\overline{T}_{satE}, \overline{T}_E) = \frac{\int_{\overline{T}_{satE}}^{\overline{T}_E} C_{PV} \cdot dT}{\overline{T}_E - \overline{T}_{satE}} = 1,97 \text{ kJ/(kg K)}$
$\overline{h}_S(\overline{T}_{satE}, \overline{W}_E, \overline{T}_E) = H_{w,g}(\overline{T}_E) + \overline{C}_{PV}(\overline{T}_{satE}, \overline{T}_E) \cdot EPB(\overline{W}_E) = 2.645,9 \text{ kJ/kg}$
$\overline{m}(\overline{W}_E, \overline{T}_E) = \overline{\rho}_{z,E}(\overline{W}_E, \overline{T}_E) \cdot V = 293,91 \text{ kg}$
$\overline{m}_{RW}(\overline{T}_{satE}, \overline{W}_E, \overline{T}_E, \overline{T}_{RWE}, \overline{T}_{RWS}) = \frac{\overline{h}_S - h_{RWS}(\overline{T}_{RWS})}{h_{RWS}(\overline{T}_{RWS}) - h_{RWE}(\overline{T}_{RWE})} \cdot \overline{m}_S = 34,98 \text{ kg/s}$
$\overline{m}_{VE} = \frac{\overline{m}_F \cdot (\overline{h}_E - \overline{h}_F) + \overline{m}_S \cdot (\overline{h}_S - \overline{h}_E)}{\overline{\lambda}_{VE}} = 0,68 \text{ kg/s}$

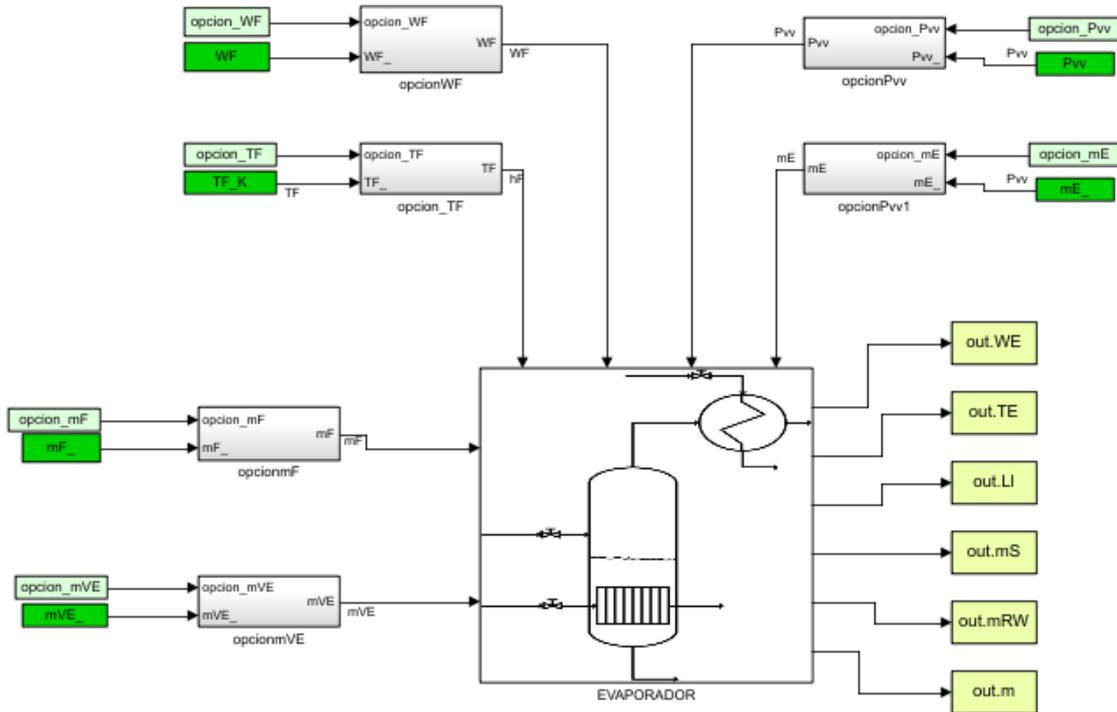


Figura 11. Evaporador en Simulink

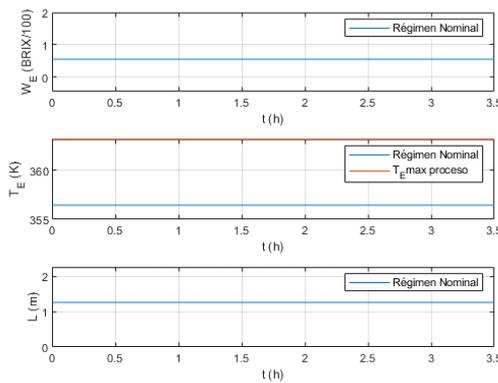


Figura 12. Régimen Nominal de operación

Para poder ver cómo es la dinámica del proceso se le tiene que realizar cambios en las variables de entrada mediante escalones, afectando a las variables de salida. Estos datos que producen estas modificaciones en la entrada se guardan y se representan las variables de salida W_E , T_E , L , como se demuestra desde la Figura 13 hasta la Figura 24. En estas figuras también se indica la temperatura máxima que puede alcanzar el proceso $T_{E,max}$ que se representa en una línea de color rojo, restricción mencionada en el apartado 1.1.1.

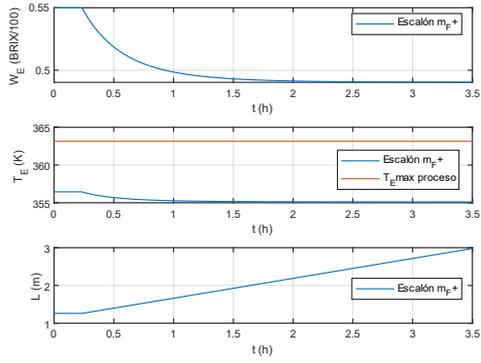


Figura 13. Escalón positivo del 4% de \overline{m}_F

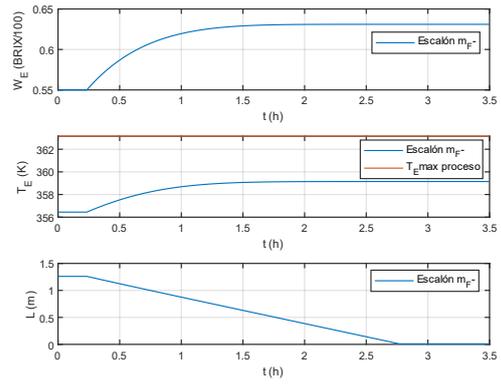


Figura 14. Escalón negativo del 4% de \overline{m}_F

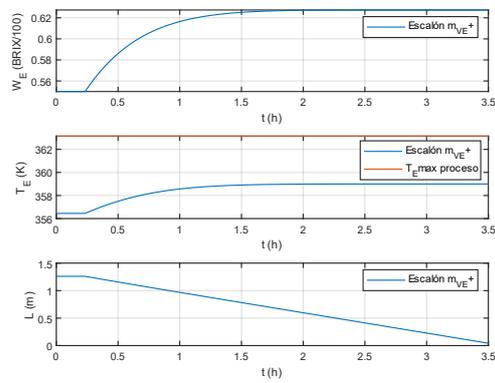


Figura 15. Escalón positivo del 4% de \overline{m}_{VE}

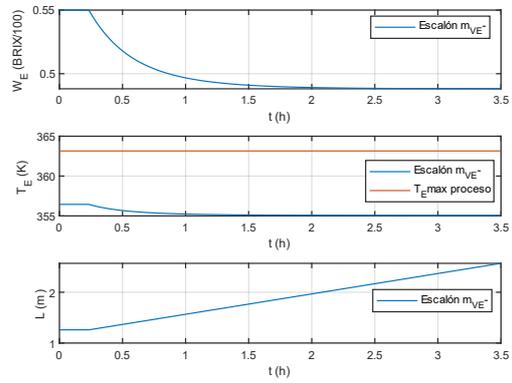


Figura 16. Escalón negativo del 4% de \overline{m}_{VE}

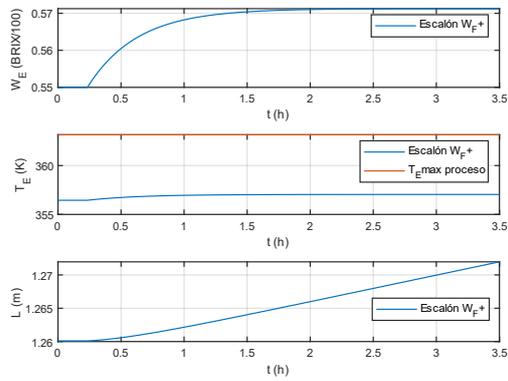


Figura 17. Escalón positivo del 4% de \overline{W}_F

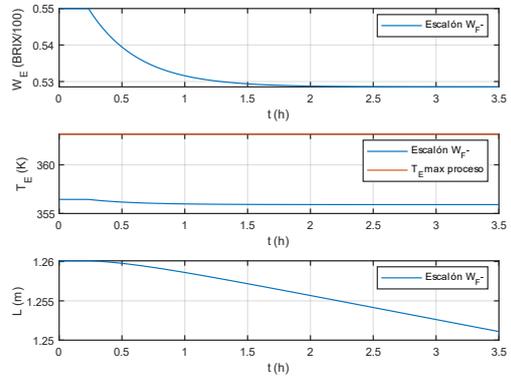


Figura 18. Escalón negativo del 4% de \overline{W}_F

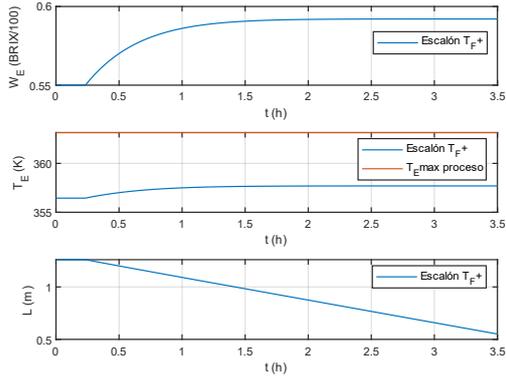


Figura 19. Escalón positivo del 4% $\overline{T_F}$

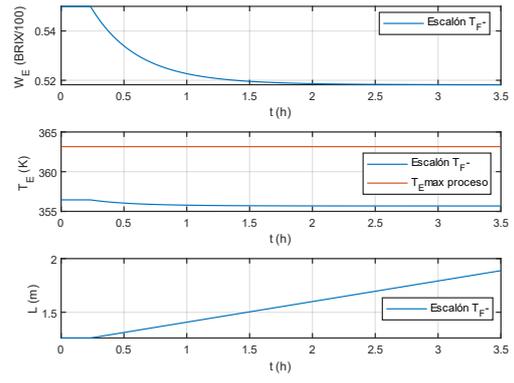


Figura 20. Escalón negativo del 4% $\overline{T_F}$

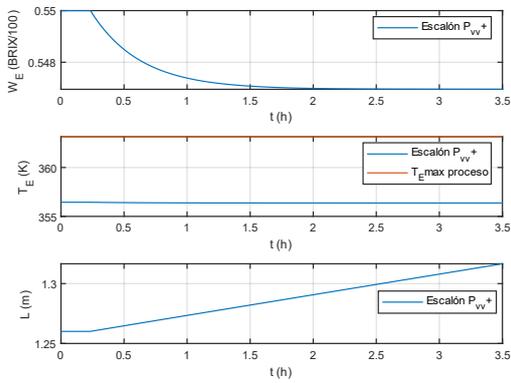


Figura 21. Escalón positivo del 4% $\overline{p_{vv}}$

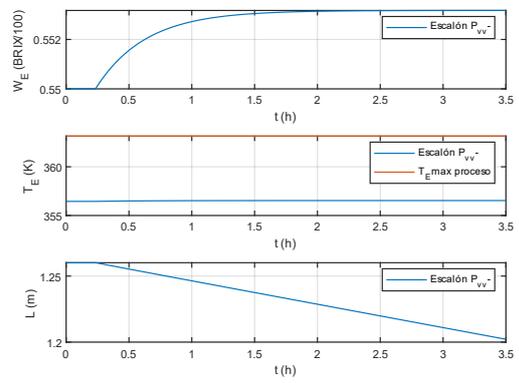


Figura 22. Escalón negativo del 4% $\overline{p_{vv}}$

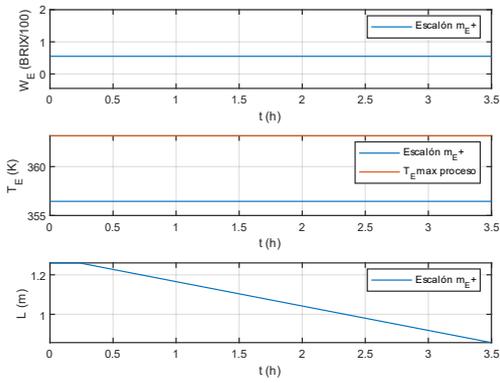


Figura 23. Escalón positivo del 4% $\overline{m_E}$

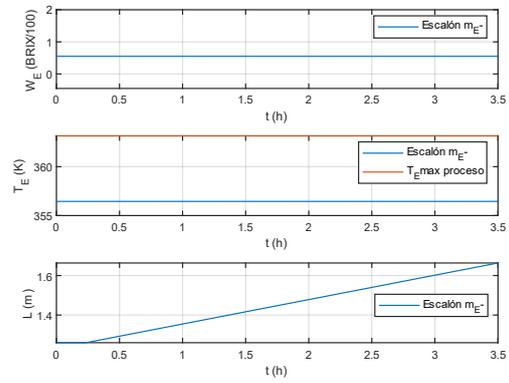


Figura 24. Escalón negativo del 4% $\overline{m_E}$

- Al aplicar un escalón en \overline{m}_F de un incremento del 4% de su valor en régimen estacionario la respuesta de las variables de salida es las que se muestra en la Figura 13, lo que se puede comprobar que a un aumento de \overline{m}_F se produce una disminución en la temperatura de salida del concentrado T_E y en consecuencia una disminución en la concentración de salida W_E . Cabe destacar que la variación que se produce en el nivel L se tiene que considerar bastante elevada.
- Por otro lado, de forma opuesta lo que sucede al realizar un escalón en \overline{m}_F de una disminución del 4% es que la temperatura T_E aumenta, en consecuencia, la concentración W_E aumenta, pero poco valor. Cabe destacar que el nivel L se va reduciendo hasta que se queda sin zumo concentrado, encontrando zumo hasta alrededor de 2 horas después del escalón. Esto se ve reflejado en la Figura 14.
- Al aplicarle un escalón del 4% a nuestro sistema en el flujo masico de vapor vivo de entrada \overline{m}_{VE} se produce un notorio aumento de la temperatura del concentrado T_E , aumentando su concentración W_E notablemente. Por lo que respecta al nivel de concentrado L se va reduciendo hasta que se extrae su totalidad. Estos cambios se ven reflejados en la Figura 15.
- En la Figura 16 se ven todos los cambios opuestos a los que se encuentran en la Figura 15 ya que se produce el escalón en el flujo de vapor vivo \overline{m}_{VE} de igual valor, pero de signo contrario, produciendo así una disminución en la temperatura de concentrado T_E , en la concentración de este W_E produciendo un aumento en el nivel del zumo L.
- La aplicación de un escalón en la concentración de zumo en la entrada \overline{W}_F de un incremento de su valor del 4% produce un escaso efecto en el proceso ya que la temperatura del concentrado T_E casi no varía y el nivel de concentrado L escasamente. Aun teniendo estas variaciones, la concentración de zumo concentrado a la salida W_E produce un aumento considerable, como se puede comprobar en la Figura 17.
- Como bien indica la Figura 18 al aplicarle una disminución del 4% de su valor en la concentración de entrada \overline{W}_F da las escasas variaciones como se ha mencionado en el escalón positivo, pero de signo contrario, por lo que solamente cabe destacar que la concentración de zumo concentrado experimentará una disminución.
- Al aplicar un escalón en la temperatura del zumo a la entrada del evaporador \overline{T}_F aumentando su valor un 4% se produce un aumento en la temperatura T_E y en consecuencia de la concentración de concentrado W_E . Por lo que respecta al nivel L cabe destacar que disminuye aun teniendo que pasar bastante de tiempo para que se quede sin concentrado el evaporador, como bien indica la Figura 19.

- Contrapuestamente la Figura 20 muestra el contrario que la Figura 19, ya que muestra lo que produce un escalón en la temperatura del zumo a la entrada $\overline{T_F}$ con una disminución del 4%, produciendo así una variación en la temperatura de zumo concentrado T_E negativa, por ende, disminuye la concentración del zumo de salida W_E . Por otro lado, el escalón también produce una variación del nivel L aumentándolo.
- Al aplicarle un escalón en la presión de vapor vivo $\overline{p_{vv}}$ que se utiliza para el calentamiento del zumo se produce una variación de la temperatura T_E , en consecuencia, de la concentración de zumo concentrado W_E . Respecto al nivel de concentrado L, la variación es relativamente pequeña lo que casi no produce variación, aun así, se tiene que tener en cuenta y conocer que se produce. Esto se puede observar en las dos figuras, Figura 21 y Figura 22, que representan la variación que producen estas variables mencionadas con respecto al escalón mencionado, tanto aumentando como disminuyendo su valor.
- Al aplicar un escalon en el flujo másico de concentrado $\overline{m_E}$ produce una variación del nivel de concentrado L residente en el evaporador, reduciendo su valor si el escalón es positivo, por el contrario, aumentando el valor si el escalón es negativo. Por lo que respecta a la concentración W_E y temperatura T_E de concentrado no resulta ninguna variación. Estas respuestas del escalón producido en $\overline{m_E}$ se pueden mostrar gráficamente en las Figura 23 y Figura 24.

Todas estas variaciones que se producen en el proceso de evaporación que se demuestran en las anteriores figuras, desde Figura 13 hasta la Figura 24, demuestran que el proceso al aplicarle alguna perturbación en las variables de entrada, independientemente de que sea voluntaria o involuntariamente, varía su correcto funcionamiento. Debido a esto, se tiene que implementar un sistema de control para poder regular todas las variables del proceso que puedan variar, para que permanezcan en los valores óptimos, alcanzando el rendimiento deseado. Este control de procesos se muestra en el siguiente apartado 4.

4 Control del proceso

4.1 Introducción al control de procesos

En todo proceso industrial se puede definir que se obtienen unas salidas a partir de unas entradas, con algunas perturbaciones que afectan al proceso como bien muestra la siguiente Figura 25. Debido a estas perturbaciones y cambios en el correcto funcionamiento del proceso en la industria se tiene que implementar un sistema de control, con la finalidad de que la planta donde se realice el proceso sea segura y estable, además de resguardar a los equipos de un deterioro repentino, poder cumplir las leyes medioambientales y optimizar las operaciones.

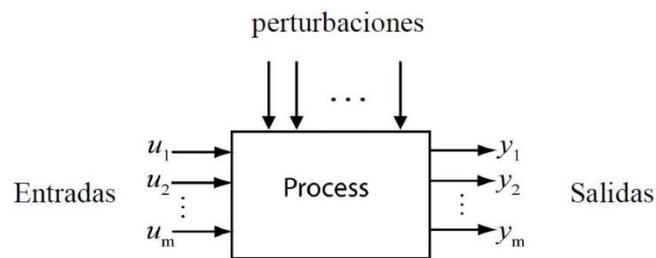


Figura 25. Proceso industrial [22]

4.1.1 Variables del proceso

Estas variables mencionadas se pueden dividir en: variable a controlar, que es la variable que se quiere mantener en un valor deseado, punto de consigna, el cual es el valor deseado para la variable a controlar, variable de control, que es la variable que se utiliza para corregir el efecto de las perturbaciones, y variable perturbación, que son las variables externas al sistema de control que afectan a las variables controladas no pudiendo actuar sobre estas.

4.1.2 Sistema de control

Todo sistema de control está compuesto por un sensor, el cual mide el fenómeno físico cuya magnitud está relacionada con el valor de la medida, transmisor, el cual convierte la magnitud del fenómeno físico en una señal estándar, el controlador, que regula la señal del sensor para que alcance el valor de la de referencia, el actuador, el cual produce el cambio en la variable de control, y el proceso a controlar. Esto lo demuestra la siguiente Figura 26.

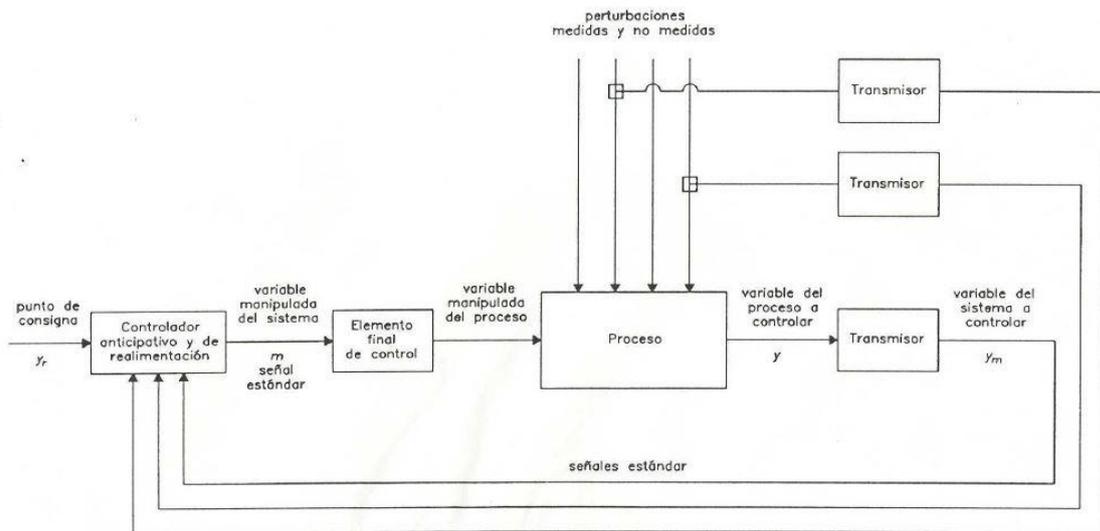


Figura 26. Sistema de control [22]

4.2 Sistema de control

4.2.1 Identificación de las variables y de los lazos de control

Tabla 15. Identificación de las variables del proceso

	Identificación
VARIABLES A CONTROLAR	T_E, L, P
PUNTOS DE CONSIGNA	T_{Er}, Lr, Pr
VARIABLES QUE AFECTAN	$W_F, \dot{m}_F, \dot{m}_{VE}, \dot{m}_{RW}, \dot{m}_E, T_F, P_{VV}, P, T_{RWE}, T_{RWS}$
VARIABLES DE CONTROL	$\dot{m}_F, \dot{m}_{VE}, \dot{m}_{RW}$
VARIABLES PERTURBACIÓN	$W_F, \dot{m}_E, T_F, P_{VV}, P, T_{RWE}, T_{RWS}$

4.2.1.1 Variables a controlar

Como bien se ha mencionado en anterioridad el proceso que se quiere controlar es la concentración de zumo de granada. Se produce este control controlando la concentración de zumo a la salida W_E .

Debido a que existe una relación entre la concentración y la temperatura, como bien muestra la (E 17), y debido a que el producto tiene una determinada restricción de temperatura, mencionada en el apartado 1.1.1, se va a controlar la T_E .

Por otro lado, se tiene que controlar el nivel L para no dejar al serpentín sin zumo, perdiendo calor transferido y pudiendo ocasionar algún deterioro repentino en el evaporador, determinando un rango de nivel en el cual el funcionamiento sea correcto.

La presión P también se tiene que controlar, debido a los siguientes requisitos que deben permanecer en el evaporador, cumpliéndose mientras la presión es constante[23]:

- Toda composición depende de la temperatura.
- El flujo de vapor evaporado dependa del aporte de calor
- No se produzcan indeseadas variaciones de flujos dentro de la planta donde se encuentre el evaporador.

4.2.1.2 Puntos de consigna

El punto de consigna en el que se trabaja inicialmente es el del régimen estacionario, por ello, los valores que se asocian al punto de consigna inicialmente son los del régimen estacionario de las diferentes variables que se van a controlar.

$$T_{Er} = \overline{T_E}$$

$$Lr = \overline{L}$$

$$Pr = \overline{P}$$

4.2.1.3 Variables que afectan

Debido a lo expuesto en el anterior apartado 3.5 se ha podido determinar que estas son las variables que afectan al proceso W_F , \dot{m}_F , \dot{m}_{VE} , \dot{m}_{RW} , \dot{m}_E , T_F , P_{VV} , P , T_{RWE} , T_{RWS} .

4.2.1.4 Variables de control

En el apartado anterior 3.8 al realizar la simulación dinámica se puede comprobar que variables de entrada afectan más a las variables a controlar escogiendo así las distintas variables de control para poder controlarlas.

Estas variables de control se va a actuar sobre ellas, modificándolas, para poder controlar las variables a controlar.

4.2.1.5 Variables perturbación

Las variables perturbación son las variables de entrada que afectan al proceso, pero no se actúan sobre ellas, es decir, son todas las variables de entrada que afectan al proceso exceptuando las variables de control.

4.2.2 Lazos de control establecidos

Las relaciones de control que se han establecido para el proceso del presente trabajo son las que se muestran en la siguiente Tabla 16, en la cual se relaciona las variables a controlar con las variables de control debido a que en el anterior apartado 3.8 se ha podido observar cómo afectan cada variable de entrada y de salida, pudiendo ver las variables que más afectan a las variables a controlar, denominándolas como las variables de control, junto a sus puntos de consigna

Tabla 16. Lazos de control

Variable a controlar		Variable de control		Punto de consigna
T_E	→	\dot{m}_{VE}	→	T_{Er}
L	→	\dot{m}_F	→	Lr
P	→	\dot{m}_{RW}	→	Pr

De aquí en adelante, se tendrá en cuenta que la variable P posee un control independiente y ya existente, por lo que siempre permanecerá en régimen estacionario, es decir, permanecerá en el punto de consigna \bar{P} , por lo que de aquí en adelante se le denominará P a la presión del evaporador ya que P y \bar{P} son el mismo valor. Por ello se tendrán en cuenta dos variables a controlar, T_E y L, por consiguiente, dos lazos de control se van a realizar.

4.3 Identificación de las funciones de transferencia del proceso

Para poder controlar el proceso que se quiere mantener en unos valores establecidos, se tiene que obtener su relación matemática linealizada en el dominio de Laplace, pudiéndose obtener a partir de distintas maneras. En este trabajo se ha obtenido a partir de datos experimentales. Como en este caso no se saben los datos experimentales reales, se ha procedido a realizar experimentos virtuales mediante la herramienta de Simulink junto con Matlab.

Cabe indicar, que a partir de ahora se va a utilizar la nomenclatura que muestra la Tabla 17 para las distintas variables involucradas en el control.

Tabla 17. Nomenclatura de control

Variables a controlar	
T_E	y_1
L	y_2
Variables de control	
\dot{m}_F	u_1
\dot{m}_{VE}	u_2
Variables perturbación	
T_F	d_1
W_F	d_2
P_{VV}	d_3
\dot{m}_E	d_4
Puntos de consigna	
T_{Er}	y_{r1}
Lr	y_{r2}

4.3.1 Obtención de las funciones de transferencia

Al tener el modelo dinámico en Simulink se han aplicado distintos escalones de amplitud 0.2% del valor en régimen estacionario de las variables de control (variables de entrada) para obtener los resultados de las variables a controlar (variables de salida).

Una vez obtenidos estos resultados, y con la ayuda del programa Matlab, se han obtenido las funciones de transferencia exponiendo los resultados obtenidos en la siguiente Tabla 18.

Cabe expresar que $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$ conforman la matriz de transferencia $G(s)$ obteniéndose a partir de los resultados de ambas variables de salida y_1 y y_2 , al aplicarle varios escalones en las dos entradas tanto u_1 , como u_2 en diferentes tiempos como se demuestra en la Figura 27. Esto es debido al saber que cada una de las variables de salida dependen de las dos variables de entrada. Por lo que esta matriz de transferencia representa al proceso, es decir, es la matriz de transferencia del proceso.

$$G(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{21}(s) \\ G_{12}(s) & G_{22}(s) \end{pmatrix} \quad (\text{E 40})$$

Por otro lado, con los resultados que se han experimentado al aplicarle escalones de amplitud 0,2 % del valor en régimen nominal de operación, aplicándole cada vez a una perturbación para obtener sus funciones de transferencia con la ayuda de Matlab y Simulink. Se han obtenido $G_{1D1}(s)$, $G_{2D1}(s)$, $G_{1D2}(s)$, $G_{2D2}(s)$, $G_{1D3}(s)$, $G_{2D3}(s)$ y $G_{2D4}(s)$ que son las perturbaciones que afectan a las salidas, como se puede observar la perturbación D_4 no afecta a la salida y_1 .

Para obtener estas funciones de transferencia se ha tenido en cuenta que las funciones son de primer orden. Para y_1 teniendo en cuenta que la respuesta es proporcional e integradora y para y_2 solamente teniendo en cuenta que tiene una respuesta integradora.

Tabla 18. Funciones de transferencia

	y_1	y_2
u_1	$G_{11}(s) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{-59,49}{1 + 1390 \cdot s}$	$G_{21}(s) = \frac{K_p}{s} = \frac{4,543 \cdot 10^{-3}}{s}$
u_2	$G_{12}(s) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{67,15}{1 + 1462 \cdot s}$	$G_{22}(s) = \frac{K_p}{s} = \frac{-3,984 \cdot 10^{-3}}{s}$
d_1	$G_{1D1}(s) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{8,295 \cdot 10^{-2}}{1 + 1434 \cdot s}$	$G_{2D1}(s) = \frac{K_p}{s} = \frac{-4,923 \cdot 10^{-6}}{s}$
d_2	$G_{1D2}(s) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{103}{1 + 1469 \cdot s}$	$G_{2D2}(s) = \frac{K_p}{s} = \frac{1,398 \cdot 10^{-4}}{s}$
d_3	$G_{1D3}(s) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{-1,703 \cdot 10^{-2}}{1 + 1412 \cdot s}$	$G_{2D3}(s) = \frac{K_p}{s} = \frac{1,028 \cdot 10^{-6}}{s}$
d_4		$G_{2D4} = \frac{K_p}{s} = \frac{-4,287 \cdot 10^{-3}}{s}$

Una vez obtenidos los resultados de las funciones de transferencia se representan con los datos de los experimentos para validar las funciones de transferencia, es decir, representar las funciones de transferencia junto con los datos experimentales obtenidos. Esta representación se realiza desde la Figura 27 hasta la Figura 34.

Como bien se observan en las figuras se asemejan las funciones de transferencia obtenidas a los datos obtenidos por el experimento. Por otro lado, cabe matizar que cuanto menor es la amplitud de los escalones en las variables de control mayor será la similitud entre las representaciones de los datos experimentales y de las funciones de transferencia. Uno de los motivos de que suceda esto es que el proceso experimental no se encuentra linealizado y las funciones de transferencia sí que lo son.

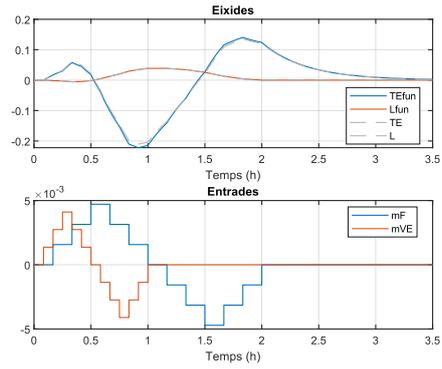


Figura 27. Identificación G

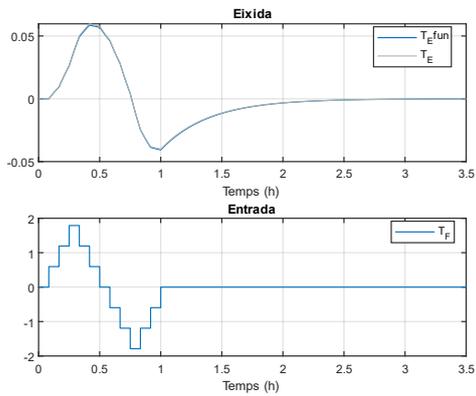


Figura 28. Identificación G_{1D1}

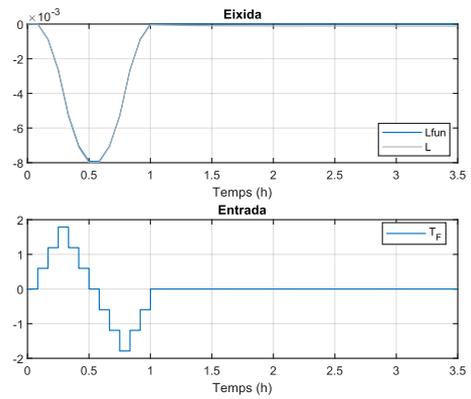


Figura 29. Identificación G_{2D1}

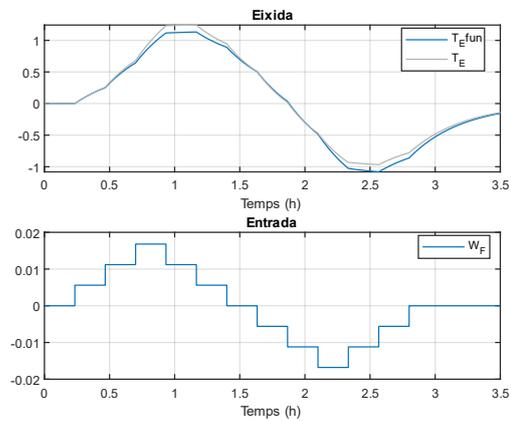


Figura 30. Identificación G_{1D2}

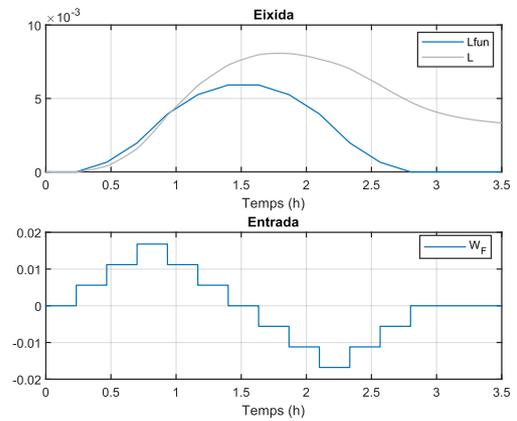


Figura 31. Identificación G_{2D2}

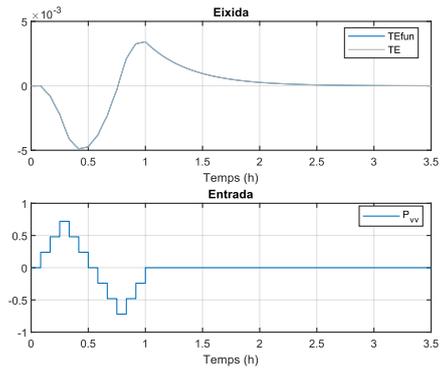


Figura 32. Identificación G_{1D3}

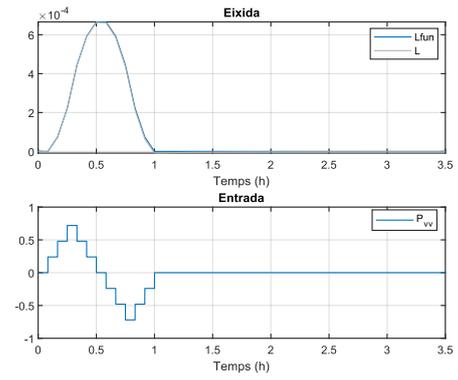


Figura 33. Identificación G_{2D3}

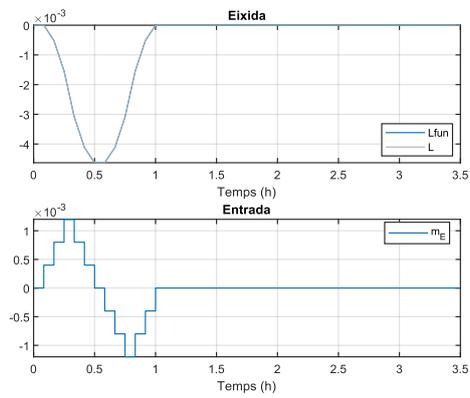


Figura 34. Identificación G_{2D4}

4.4 Diagramas de bloques del sistema de control

Una vez están todas las funciones de transferencia del proceso y de las perturbaciones identificadas, se puede obtener los diagramas de bloques de ambos lazos de control, para poder controlar las variables a controlar, conformando un sistema de control descentralizado. Siendo un diagrama que representa un control con realimentación en lazo cerrado

Se puede identificar en el proceso las distintas funciones de transferencia que representan a las distintas partes de nuestro sistema de control. $G_{C1}(s)$ y $G_{C2}(s)$ representan las funciones de los controladores, $G_{V1}(s)$ y $G_{V2}(s)$ las funciones de las válvulas que actúan en nuestro sistema, $G(s)$ la función de transferencia del proceso y $D_1(s)$, $D_2(s)$, $D_3(s)$, $D_4(s)$ las funciones de transferencia de las perturbaciones del proceso. Estas funciones de transferencia de las perturbaciones están formadas por las distintas funciones de transferencia que se han obtenido en la Tabla 18. Las funciones de transferencia de las perturbaciones en forma matricial se representan en la siguiente Figura 36.

Cabe destacar que en estos diagramas no se van a tener en cuenta las funciones de transferencia del sensor al ser cancelada la acción sobre el sistema por la constante de adaptación de la variable medida por el sensor, para poder construir la variable de error en las unidades de la salida controlada.

En el diagrama de la Figura 35 se saben solamente las funciones de transferencia del proceso y las de las perturbaciones, seguidamente se van a obtener las demás funciones.

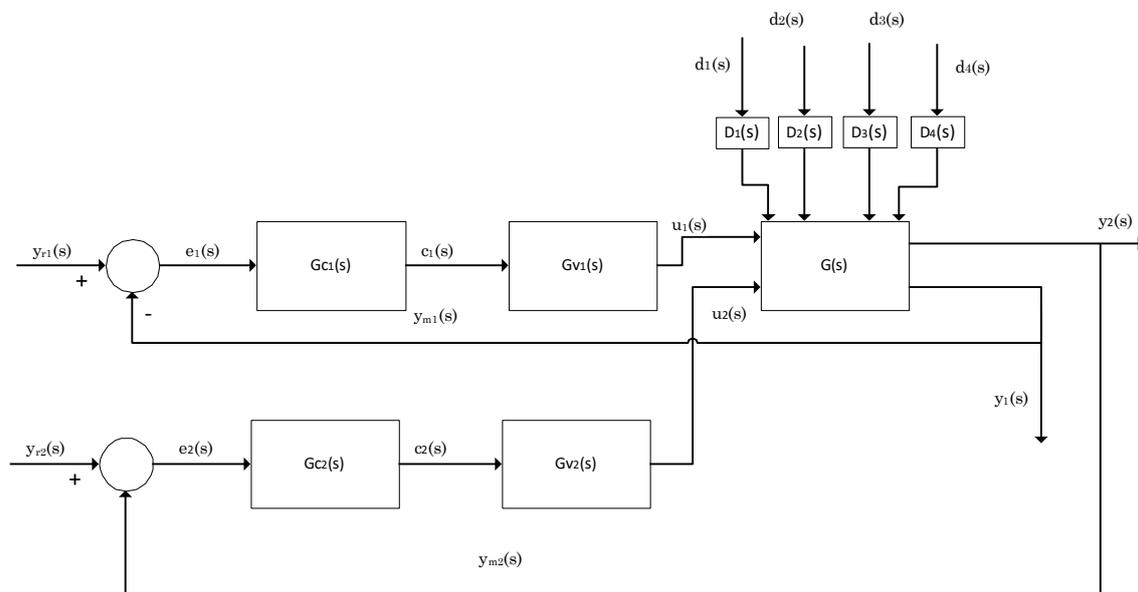


Figura 35. Diagrama de bloques juntando los lazos de control

$$D_1(s) = (G_{1D1}(s) \quad G_{2D1}(s)) \quad D_2(s) = (G_{1D2}(s) \quad G_{2D2}(s))$$

$$D_3(s) = (G_{1D3}(s) \quad G_{2D3}(s)) \quad D_4(s) = G_{2D4}(s)$$

Figura 36. Funciones de transferencia de las perturbaciones

4.5 Lugar geométrico de las raíces

En todo sistema de realimentación la respuesta transitoria dependerá de los polos de lazo cerrado. Todos los posibles polos de lazo cerrado que se pueden encontrar en un sistema se pueden representar gráficamente en una gráfica, siendo esta la representación del lugar geométrico de las raíces. Esta representación facilita la obtención de los polos más adecuados para el sistema ya que los polos varían con respecto a la ganancia de lazo abierto del sistema. Este lugar geométrico de las raíces es muy útil ya que depende de la ganancia de lazo abierto, teniendo en cuenta que se sabe que los polos en lazo cerrado son distintos de los de lazo abierto.

En el sistema del presente trabajo se ha obtenido el lugar geométrico de las raíces como se representa en las siguientes Figura 37 y Figura 38, para ambos lazos de control. Estos se han obtenido a partir de las ecuaciones de transferencia en lazo abierto que son (E 41) y (E 42). Estas dos ecuaciones se han tenido en cuenta solamente la entrada y la salida de cada lazo de control, por lo que se han utilizado $G_{12}(s)$ y $G_{21}(s)$ para y_1 y y_2 .

$$L_1(s) = G_{12}(s) \cdot G_{V1}(s) = \frac{9,1878 \cdot 10^{-4}}{(s + 6,841 \cdot 10^{-4})} \quad (\text{E 41})$$

$$L_2(s) = G_{21}(s) \cdot G_{V2}(s) = \frac{9,0851 \cdot 10^{-5}}{s} \quad (\text{E 42})$$

Las dos otras funciones son las de las válvulas que son los elementos que actúan para regular el proceso en cada lazo de control, se han obtenido a partir de las ecuaciones (E 43) y (E 44).

$$G_{V1}(s) = K_{V1} = \frac{\dot{m}_{VE,V,max}}{u_{1,max}} = \frac{2,0}{100} = 0,02 \quad (\text{E 43})$$

$$G_{V2}(s) = K_{V2} = \frac{\dot{m}_{F,V,max}}{u_{2,max}} = \frac{2,0}{100} = 0,02 \quad (\text{E 44})$$

Para poder obtener el lugar de las raíces se han transformado las ecuaciones (E 41) y (E 42) en su forma compleja para poder representarlo en el plano complejo, como se demuestra en las ecuaciones (E 45) y (E 46). Obteniéndose t_s de la representación gráfica de las funciones de transferencia $G_{12}(s)$ y $G_{21}(s)$.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{4}{t_s} = \frac{4}{1,75 \cdot 3600} = 6,3492 \cdot 10^{-4} \quad (\text{E } 45)$$

$$S_1 = S_2 = -\sigma_1 + \sigma_1 j \quad (\text{E } 46)$$

Al tener las anteriores ecuaciones y añadiéndole un polo en el origen resultan las representaciones graficas del lugar geométrico de las raíces de ambos lazos de control. En esta representación los polos son los representados por las aspas, las líneas azules y verdes son los lugares donde pueden configurarse los polos.

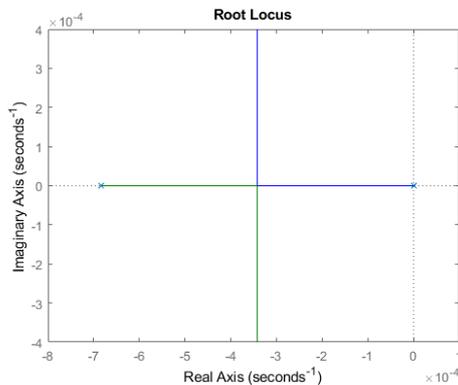


Figura 37. LGR_y1

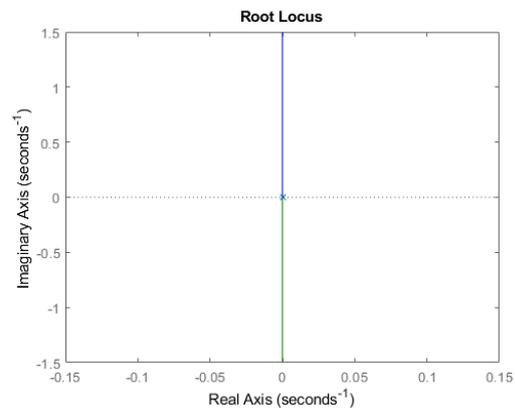


Figura 38. LGR_y2

Una vez se tiene el lugar geométrico de las raíces se procede a la obtención de las funciones de transferencia del regulador que se expresan en las ecuaciones (E 47) y (E 48), teniendo un cero que se le ha dado los valores expresados en las ecuaciones y un polo en el origen para rechazar las perturbaciones y eliminar el error en régimen permanente, debido a la acción integral del regulador.

$$G_{C1}(s) = \frac{2 \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s} \quad (\text{E } 47)$$

$$G_{C2}(s) = \frac{25 \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s} \quad (\text{E } 48)$$

Seguidamente se obtiene la función de transferencia en lazo abierto junto a la función del controlador en cada lazo de control y resultan las ecuaciones (E 49) y (E 50).

$$M_1 = G_{C1}(s) \cdot L_1(s) = \frac{1,8376 \cdot 10^{-3} \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s^2 + 2,522 \cdot 10^{-3} \cdot s + 2,756 \cdot 10^{-6}} \quad (\text{E } 49)$$

$$M_2 = G_{C2}(s) \cdot L_2(s) = \frac{2,2713 \cdot 10^{-3} \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s^2 + 2,271 \cdot 10^{-3} \cdot s + 3,407 \cdot 10^{-6}} \quad (\text{E } 50)$$

Una vez se tienen las funciones de transferencia en lazo abierto se obtienen los polos de lazo cerrado variando las ganancias indicados con un aspa roja, mostrándose en la Figura 39 y Figura 40, y se obtienen los valores del regulador, reuniéndose en la siguiente Tabla 19.

Al tener los datos de los reguladores se procede a la obtención explícita de la configuración que tiene que tener el controlador que se expresa en las siguientes ecuaciones (E 51) y (E 52)

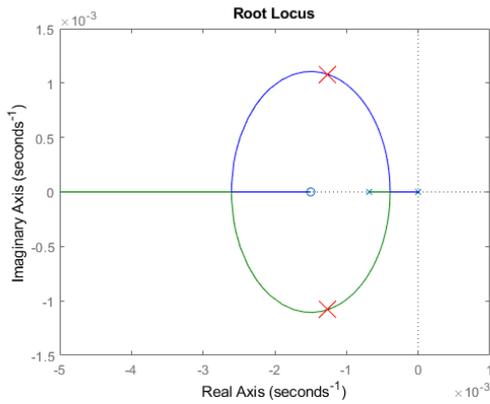


Figura 39. LGR_LA1

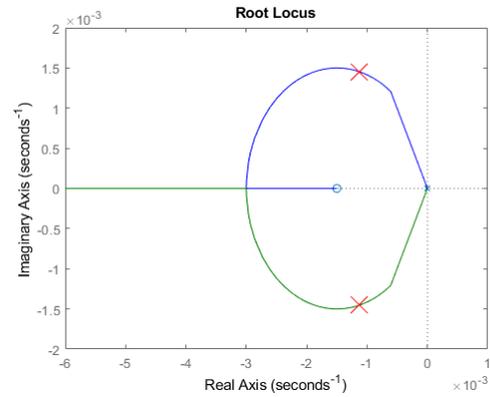


Figura 40. LGR_LA2

$$G_{C1}(s) = \frac{2 \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s} = K_{p,1} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i,1}} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (\text{E } 51)$$

$$G_{C2}(s) = \frac{25 \cdot (s + 1,5 \cdot 10^{-3})}{s} = K_{p,2} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i,2}} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (\text{E } 52)$$

Tabla 19. Valores de los parámetros de los controladores

	K_p	T_i (s)
$G_{C1}(s)$	2	667
$G_{C2}(s)$	25	667

4.6 Control mediante desacoplo inverso

Como bien se ha mostrado el sistema de control es descentralizado, con dos variables de entrada y dos de salida, junto a varias perturbaciones. Al tener una gran interacción entre ellas, es decir que las variables de salida dependen cada una de las dos variables de entrada, es difícil de controlar, mediante un control descentralizado, como bien muestra la siguiente Figura 41 y Figura 42.

Debido a este problema se centraliza la acción de control, produciendo una independencia de las variables de salida respecto a las de entrada. Esta centralización de la acción de control se le llama control por desacoplo, que se puede enfocar de varias formas, pero en este presente trabajo se ha tratado con una red de desacoplo y un controlador diagonal (controlador que cada salida depende de una sola entrada). Debido a que el proceso que se trata es no lineal se le tiene que aplicar el desacoplo inverso, el cual modifica las variables de entrada al proceso.

4.6.1 Obtención de la red de desacoplo inverso

La obtención de la red de desacoplo, es decir, de la matriz de desacoplo se obtiene desde la ecuación (E 53) hasta (E 58) que representan la respuesta de las salidas respecto a las entradas.

$$y_1(s) = G_{11}(s) \cdot u_1(s) + G_{12}(s) \cdot u_2(s) \quad (\text{E 53})$$

$$y_2(s) = G_{21}(s) \cdot u_1(s) + G_{22}(s) \cdot u_2(s) \quad (\text{E 54})$$

Para poder cancelar la salida se le va a aplicar las distintas configuraciones, que se muestran seguidamente en las ecuaciones (E 55) y (E 56).

Para cancelar el efecto de $u_1(s)$ sobre $y_1(s)$, se sustituye la siguiente ecuación (E 55) a la ecuación (E 53).

$$u_2(s) = -\frac{G_{11}(s)}{G_{12}(s)} \cdot u_1(s) \quad (\text{E 55})$$

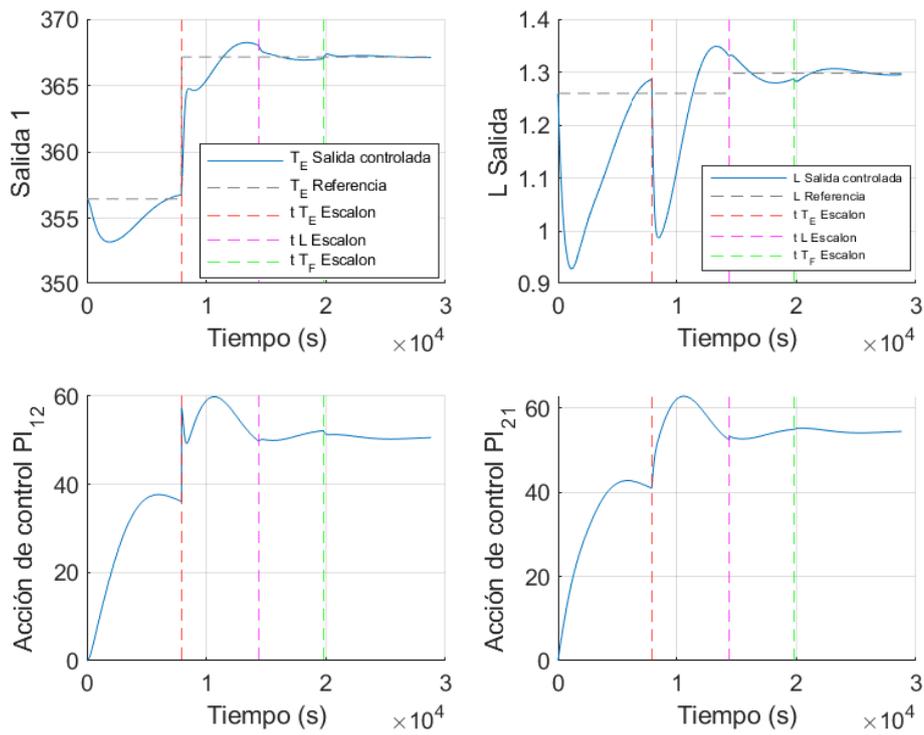


Figura 41. Control. Escalones y_{r1} , y_{r2} , d_1

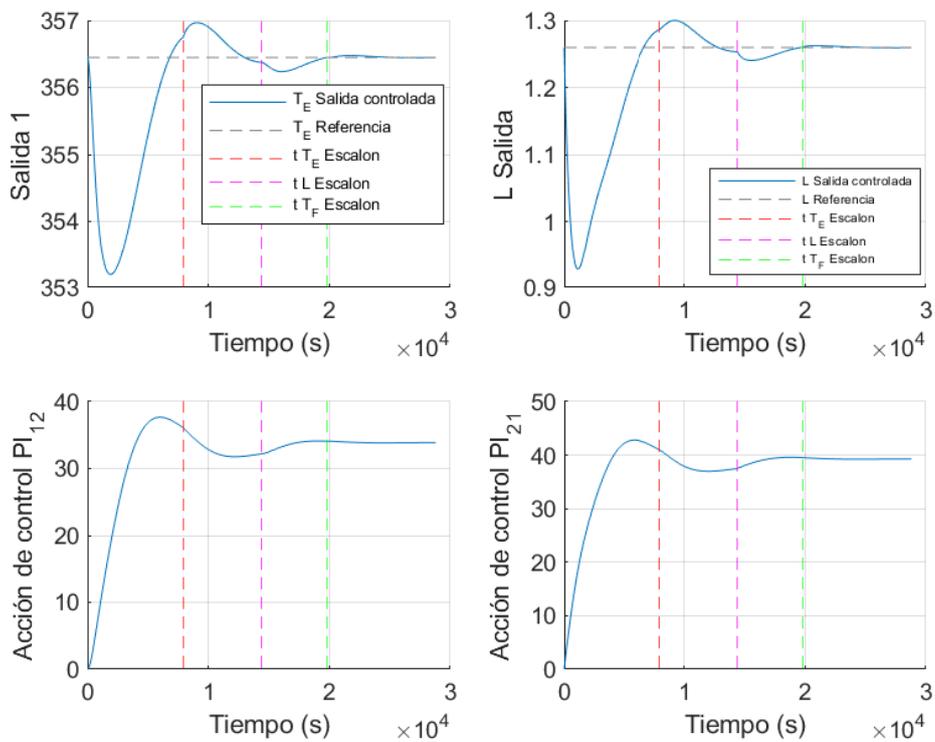


Figura 42. Control. Escalones, d_2 , d_3 , d_4

Para cancelar el efecto de $u_2(s)$ sobre $y_2(s)$, se sustituye la siguiente ecuación (E 56) a la ecuación (E 54).

$$u_1(s) = -\frac{G_{22}(s)}{G_{21}(s)} \cdot u_2(s) \quad (\text{E } 56)$$

Teniendo que aplicarle las siguientes dos ecuaciones (E 57) y (E 58) a las variables de entrada.

$$D_{u1} = -\frac{G_{11}(s)}{G_{12}(s)} \quad (\text{E } 57)$$

$$D_{u2} = -\frac{G_{22}(s)}{G_{21}(s)} \quad (\text{E } 58)$$

Una vez se tiene todo claro sobre la red de desacoplo se implementa en Simulink resultando la siguiente Figura 43.

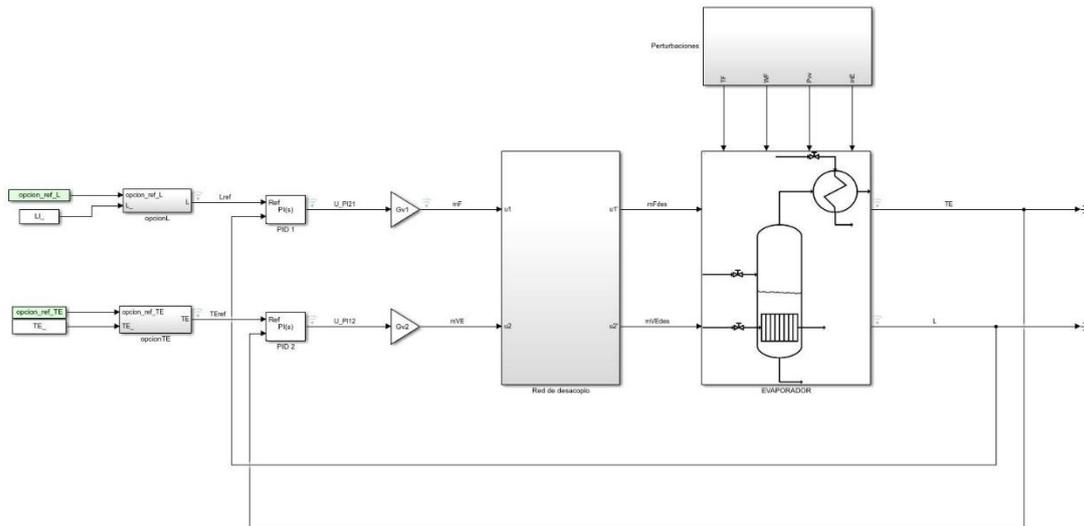


Figura 43. Sistema de control con desacoplo en Simulink

Una vez configurado el sistema de desacoplo se simula y se obtiene la respuesta del control en el sistema dando lugar a las siguientes Figura 44 y Figura 45. Estas figuras representan la respuesta de los controladores frente a cambios en las referencias y perturbaciones del proceso, indicando cada escalón en que tiempo se produce.

Cabe notar que la diferencia entre tener la matriz de desacoplo y no tenerla es notable, al tener una respuesta correcta y rápida del controlador con su presencia. Cabe destacar que en la puesta en marcha del proceso el controlador tiene que actuar, debido a posibles errores a lo largo de la obtención del proceso y de la configuración del controlador.

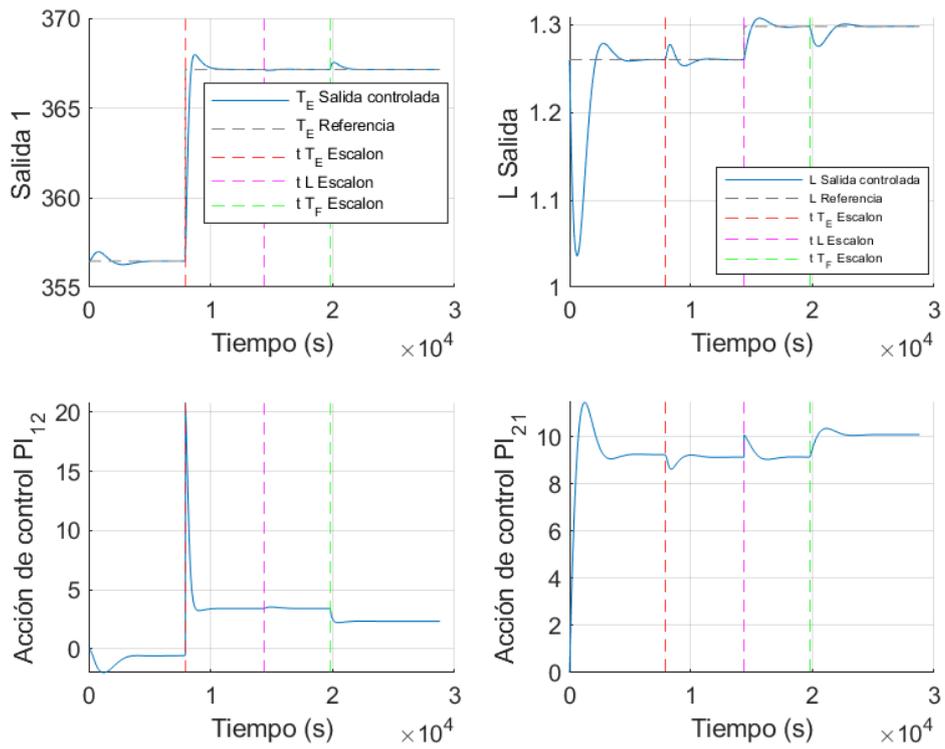


Figura 44. Control con desacoplo. Escalones y_{r1} , y_{r2} , d_1 .

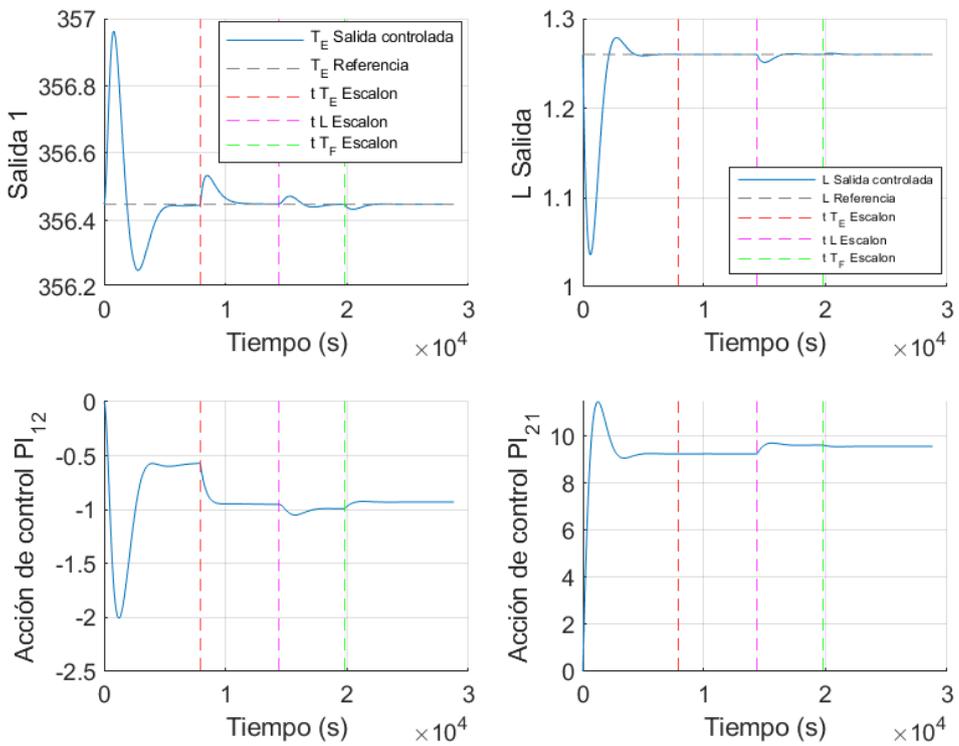


Figura 45. Control con desacoplo. Escalones d_2 , d_3 , d_4 .

5 Estimación económica

La economía de una empresa es una de las principales preocupaciones que influyen en el devenir de esta, por este motivo, al implementar un sistema de control nuevo en cualquier empresa, más particularmente en cualquier planta industrial, se debe tener en cuenta el sobrecoste económico que producirá la implementación del sistema de control en la empresa, pudiendo valorar así si la empresa puede asumirlo o por el contrario poder rechazar esa implementación.

Por esta razón se ha realizado una estimación económica la cual tiene en cuenta la implementación del sistema de control ascendiendo a un total de 16.734,59 €, aunando los costes económicos producidos por el hardware a implementar y el operario que se hace cargo de su diseño y puesta en marcha, como bien se sabe que es el ingeniero químico responsable. Más detalladamente se puede mostrar en la siguiente Tabla 20.

Tabla 20. Coste económico del sistema de control [24]

Componentes (Hardware)		
Componente	Coste (€)	
PLC Siemens 1214C [25]	601,37 € (IVA incl)	
Sensor de temperatura. E5CSV-R1T-500 AC100-240 Omron [26]	111,00 € (IVA incl)	
Sensor de nivel. Ifm electronic LR3000 [27]	373,89 € (IVA incl)	
Sensor de presión diferencial. Telemecanique Sensor [28]	131,93 € (IVA incl)	
3x Valvulas. K2 20 "Hydro" Sobrevelocidad. Series 0220110 [29]	11612,4 € (IVA incl)	
Ingeniero Químico (16 €/h) [30]		
Tarea	Horas	Coste (€)
Analizar el sistema	4	64
Identificar, validar y obtener funciones de transferencia	64	1024
Diseñar el sistema de control	72	1152
Implementar el Sistema de control	40	640
Validar y ajustar en planta real el sistema de control	64	1024
Coste Total (€)		
16734,59 €		

6 Conclusiones

Los principales objetivos del presente trabajo, que eran el modelado y la simulación de un evaporador para concentrar zumo de granada, se han obtenido al tener un modelo que se ajusta al proceso real y un sistema de control obtenido que controla alguna variación en las entradas del evaporador. Cabe decir que es mejorable, ya que se pueden ajustar más los datos obtenidos en la simulación virtual a la realidad de la planta, obteniendo los datos en la propia planta a implementar el sistema de control, por otro lado, también se pueden ajustar mejor las ganancias de los controladores para que den otros polos mejor situados en el lugar de las raíces, produciendo un control mejorado al que se produce.

Con respecto al modelado, cabe destacar que es necesario mayor estudio en profundidad al solo modelar un evaporador, faltando estudiar el sistema de evaporadores multiefecto completo.

Por lo que respecta al control del evaporador, cabe destacar que implementar al proceso un sistema de desacoplo inverso aumenta el rendimiento del controlador en el proceso, reduciendo el tiempo de la respuesta de control. Con ello se reducen las pérdidas, tanto materiales como económicas, por cambios aleatorios no deseados.

Por otro lado también se puede mejorar el control obteniendo el sistema de control sobre la presión P del evaporador pudiendo controlar alguna variación que se pueda producirse en el evaporador.

Cabe destacar, que en la planta donde se tenga que implementar el sistema de control se debe tener en cuenta que tendrá un error al ser obtenido virtualmente el modelado y no mediante datos empíricos de la propia planta, que se quiera implementar, produciendo una configuración en planta laboriosa.

La importancia que tienen los estudios que se producen similares a este es debido a que las empresas demandan una producción alta, por lo que tienen que ser optimas, para poder salvaguardar la vida de las empresas.

Respecto a los objetivos de desarrollo sostenible se pueden comprobar que se pueden satisfacer como bien se han enumerado en el apartado 2.3, debido a controlar y obtener la producción del zumo de granada. Pudiendo exportar y abastecer en mayor medida a todas las partes del planeta, sin tener en cuenta costes económicos adicionales. Por otro lado, se puede reutilizar agua, que estaba contenida en el zumo de granada, dándole diferentes usos.

7 Bibliografía

- [1] Gobierno de España, “Análisis provincial de superficie, arboles diseminados, rendimiento y producción,” *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*.
- [2] I. Ángel, C. Sánchez, and Á. A. Carbonell Barrachina, “LA FRUTA GRANADA CULTIVADA EN ESPAÑA”.
- [3] “Procedimiento para la obtención de zumos pasteurizados por homogenización a alta presión,” Feb. 2011.
- [4] M. Fazaeli, S. Yosef, and Z. Emam-Djomeh, “Investigation on the effects of microwave and conventional heating methods on the phytochemicals of pomegranate (*Punica granatum* L.) and black mulberry juices,” *Food Research International*, vol. 50, no. 2, pp. 568–573, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.FOODRES.2011.03.043.
- [5] G. Ferrari, P. Maresca, and R. Ciccarone, “The application of high hydrostatic pressure for the stabilization of functional foods: Pomegranate juice,” *Journal of Food Engineering*, vol. 100, no. 2, pp. 245–253, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2010.04.006.
- [6] G. J. Swart, C. M. Blignaut, and P. J. Jooste, “PASTEURIZATION | Other Pasteurization Processes,” *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, pp. 4401–4406, Jan. 2003, doi: 10.1016/B0-12-227055-X/00892-0.
- [7] S. Vegara Gomez, “UMH: Estrategias tecnológicas para optimizar la producción y la vida útil de zumo de granada (*Punica granatum* cv. Mollar),” UNIVERSIDAD Miguel Hernandez, 2014. Accessed: Jul. 12, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.umh.es/handle/11000/1548>
- [8] H. Bozkurt, F. Göğüş, and S. Eren, “Nonenzymic browning reactions in boiled grape juice and its models during storage,” *Food Chemistry*, vol. 64, no. 1, pp. 89–93, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0308-8146(98)00081-8.
- [9] J. G. Caturla, J. L. García, S. Cayetano, and C. Navarrete, “Diseño de una unidad de evaporación multiefecto para la concentración de zumo de granada MEMORIA PRESENTADA POR: TUTORES: GRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA”.

- [10] A. Adnan, M. Mushtaq, and T. ul Islam, "Fruit Juice Concentrates," *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*, pp. 217–240, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-802230-6.00012-6.
- [11] P. J. Fellows, "Evaporation and distillation," *Food Processing Technology*, pp. 389–413, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-85737-6.00016-9.
- [12] F. Suñer Pedro and C. Giráldez Marta, "TIPOS DE EVAPORADORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA Apellidos, nombre Ortola Ortola Maria Dolores".
- [13] "Thermal Vapor Recompression | GIG Karasek Dubai UAE | Saudia Arabia." <https://bft-gig.com/gig-product/thermal-vapor-recompression-tvr/> (accessed Jul. 25, 2022).
- [14] W. L. Kerr, "Food Drying and Evaporation Processing Operations," *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition*, pp. 317–354, Jan. 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-385881-8.00012-4.
- [15] R. Mantelatto, D. Oliveira, J. Lopes, F. Neto, and B. Sugar Mill, "PRELIMINARY TRIALS ON THE USE OF A THERMALLY ACCELERATED SHORT TIME EVAPORATOR (TASTE) IN THE SUGAR INDUSTRY Factory Engineering PRELIMINARY TRIALS ON THE USE OF A THERMALLY ACCELERATED SHORT TIME EVAPORATOR (TASTE) IN THE SUGAR INDUSTRY", Accessed: Jul. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/312473421>
- [16] S. Chantasiriwan, "Increased Energy Efficiency of a Backward-Feed Multiple-Effect Evaporator Compared with a Forward-Feed Multiple-Effect Evaporator in the Cogeneration System of a Sugar Factory," *Processes 2020, Vol. 8, Page 342*, vol. 8, no. 3, p. 342, Mar. 2020, doi: 10.3390/PR8030342.
- [17] "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible." <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accessed Jul. 18, 2022).
- [18] O. A. Mendieta Menjura and H. Escalante Hernández, "Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana," *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, vol. 14, no. 2, pp. 113–127, Oct. 2013, doi: 10.21930/RCTA.VOL14_NUM2_ART:403.

- [19] “Sugar Engineers.” <http://sugartech.co.za/> (accessed Jul. 13, 2022).
- [20] “The Engineering ToolBox.” <https://www.engineeringtoolbox.com/> (accessed Jul. 13, 2022).
- [21] R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, “Perry manual del ingeniero químico.” 1992.
- [22] S. Cayetano Cardona Navarrete, “UNIDAD I: INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS QUÍMICOS Tema 1.-Introducción al Control de Procesos Químicos.”
- [23] R. E. Underdown, “The dynamics and control of chemical evaporators,” Adelaide, 1972. Accessed: Jul. 13, 2022. [Online]. Available: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/20437>
- [24] J. Barea Rey Tutores and A. C. Hilario Caballero Salvador Cardona Navarrete, “TRABAJO FIN DE GRADO Control avanzado de un sistema de refrigeración”.
- [25] “SIEMENS - SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, CPU compacta, DC/DC/DC - MasVoltaje.com.” <https://masvoltaje.com/simatic-s7-1200/1197-simatic-s7-1200-cpu-1214c-cpu-compacta-dc-dc-dc-6940408101326.html> (accessed Jul. 27, 2022).
- [26] “E5CSV-R1T-500 AC100-240 Omron.” https://es.wiautomation.com/omron/productos-generales/E5CSV1T500?utm_source=shopping_free&utm_medium=organic&utm_content=ES138135&gclid=CjwKCAjw2rmWBhB4EiwAiJ0mtW4S0ajBbg_c6PXbuJUwvc1gNSP-WtUV-FIvNtozATKBy7SZ4wyJtRoC2twQAvD_BwE (accessed Jul. 27, 2022).
- [27] “Sensor electrónico de nivel ifm electronic LR3000 | Automation24.” https://www.automation24.es/sensor-electronico-de-nivel-ifm-electronic-lr3000?previewPriceListId=1&refID=adwords_shopping_ES&gclid=CjwKCAjw2rmWBhB4EiwAiJ0mtQS2WQwev1HVgBs1UF2rRkWsLZaqGUmKWq-eeopxUnE9wDtewUrvHhoCQesQAvD_BwE (accessed Jul. 27, 2022).
- [28] “XMLA010A2S11 | Sensor de presión diferencial Telemecanique Sensors, 0.6bar → 10bar, G1/4, 120 → 240 V ac, 250 V dc, salida | RS Components.” [https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-presion/3025838?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_ES_ES_Automatizacion_y_Control_de_Procesos_Whoop-_\(ES:Whoop!\)+Sensores+de+Presi%C3%B3n-_-](https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-presion/3025838?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_ES_ES_Automatizacion_y_Control_de_Procesos_Whoop-_(ES:Whoop!)+Sensores+de+Presi%C3%B3n-_-)

3025838&matchtype=&aud-813230962291:pla-
299937282936&gclid=CjwKCAjw2rmWBhB4EiwAiJ0mtZ1I_VdBoTWf
Txt5qhwfgnuTWCH5mM-
Ay4LYzyQv72B8CbWLN7ZfwBoCuCAQAvD_BwE&gclidsrc=aw.ds
(accessed Jul. 27, 2022).

- [29] “TARIFA DE PRECIOS 2018”.
- [30] “¿Cuánto Cobra un Ingeniero Químico? (Sueldo 2022) | Jobted.es.”
<https://www.jobted.es/salario/ingeniero-qu%C3%ADmico> (accessed Jul.
27, 2022).
- [31] E. Simón Pérez, “MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA EN ECOSIMPRO DE UNA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN DE LA INDUSTRIA AZUCARERA”.

8 Anexos

8.1 Anexo 1: Entalpía de zumo de granada

Tabla 21. Entalpía de zumo de granada [19]

°B(0-1)/T(K)	308	313	318	323	328	333	338	343	348	353
0,12	136.5	156.1	175.8	195.4	215.1	234.8	254.5	274.2	294	313.7
0,17	132.4	151.4	170.5	189.6	208.7	227.9	247.1	266.3	285.6	304.9
0,22	128.2	146.7	165.2	183.8	202.4	221	239.7	258.5	277.2	296
0,27	124.1	142	160	178	196.1	214.2	232.4	250.6	268.9	287.2
0,32	119.9	137.3	154.7	172.2	189.7	207.3	225	242.7	260.5	278.4
0,37	115.7	132.5	149.4	166.4	183.4	200.5	217.6	234.9	252.2	269.5
0,42	111.6	127.8	144.2	160.6	177.1	193.61	210.3	227	243.8	260.7
0,47	107.4	123.1	138.9	154.8	170.7	186.8	202.9	219.1	235.4	251.8
0,52	103.2	118.4	133.6	149	164.4	179.9	195.5	211.3	227.1	243
0,57	99.1	113.7	128.4	143.1	158.1	173.1	188.2	203.4	218.7	234.2
0,62	94.9	108.9	123.1	137.3	151.7	166.2	180.8	195.5	210.4	225.3

8.2 Anexo 2: Temperatura y presión de saturación del agua

Tabla 22. Presión de saturación del agua [20]

Temperatura (°C)	Presión (kPa)
0,01	0,61165
2	0,70599
4	0,81355
10	1,2282
14	1,599
18	2,0647
20	2,3393
25	3,1699
30	4,247
34	5,3251
40	7,3849
44	9,1124
50	12,352
54	15,022
60	19,946

Temperatura (°C)	Presión (kPa)
70	31,201
80	47,414
90	70,182
96	87,771
100	101,42
110	143,38
120	198,67
130	270,28
140	361,54
150	476,16
160	618,23
180	1002,8
200	1554,9
220	2319,6

8.3 Anexo 3: Calor latente de vaporización del agua

Tabla 23. Calor latente de vaporización del agua líquida [20]

Temperatura (°C)	ΔH_{vap} (kJ/kg)	Temperatura (°C)	ΔH_{vap} (kJ/kg)
0,01	2500,9	90	2282,5
2	2496,2	96	2266,9
4	2491,4	100	2256,4
10	2477,2	110	2229,6
14	2467,7	120	2202,1
18	2458,3	140	2144,3
20	2453,5	160	2082
25	2441,7	180	2014,2
30	2429,8	200	1939,7
34	2420,3	220	1857,4
40	2406	240	1765,4
44	2396,4	260	1661,6
50	2381,9	280	1543
54	2372,3	300	1404,6
60	2357,7	320	1238,4
70	2333	340	1027,3
80	2308	360	719,8

8.4 Anexo 4: Entalpía del agua líquida

Tabla 24. Entalpía de agua líquida [20]

Temperatura (°C)	KJ/Kg
0,01	0,000612
10	42
20	84
25	104,83
30	125,73
40	167,53
50	209,34
60	251,18
70	293,07
80	335,01
90	377,04
100	419,17
110	461,42
120	503,81

Temperatura (°C)	KJ/Kg
140	589,2
160	675,5
180	763,1
200	852,3
220	943,6
240	1038
260	1135
280	1237
300	1345
320	1462
340	1595
360	1762
374	2084

8.5 Anexo 5: Densidades de la glucosa, fructosa y agua

Tabla 25. Densidades de la glucosa, fructosa y el agua

T (K)	Densidad Glucosa (kg/m3)	Densidad Fructosa (kg/m3)	Densidad Agua (kg/m3)
298,15	1647,23	1479,78	996,565
303,15	1633,15	1475,06	995,029
308,15	1619,16	1470,35	993,348
313,15	1605,25	1465,63	991,523
318,15	1591,42	1460,9	989,553
323,15	1577,67	1456,18	987,44
328,15	1564	1451,45	985,187
333,15	1550,41	1446,71	982,793
338,15	1536,9	1441,98	980,26
343,15	1523,47	1437,24	977,589
348,15	1510,11	1432,49	974,783
353,15	1496,83	1427,75	971,841
358,15	1483,62	1422,99	968,767
363,15	1470,49	1418,24	965,561
368,15	1457,43	1413,48	962,225
373,15	1444,44	1408,71	959,463

8.6 Anexo 6: Deducción general de la ecuación de la densidad de zumo de granada.

$$\begin{array}{llll}
 \text{A} & W_A = \frac{m_A}{m_A+m_B+m_C} & \rho_A = \frac{m_A}{v_A} & v_A = \frac{V_A}{V_A+V_B+V_C}, \\
 \text{B} & W_B = \frac{m_B}{m_A+m_B+m_C} & \rho_B = \frac{m_B}{v_B} & v_B = \frac{V_B}{V_A+V_B+V_C}, \\
 \text{C} & W_C = \frac{m_C}{m_A+m_B+m_C} & \rho_C = \frac{m_C}{v_C} & v_C = \frac{V_C}{V_A+V_B+V_C}
 \end{array}$$

Mezcla A+B+C

$$\rho_{total} = W_A \cdot \rho_A + W_B \cdot \rho_B + W_C \cdot \rho_C \quad (\text{E 59})$$

$$\rho_{total} = \frac{m_A + m_B + m_C}{v_A + v_B + v_C} = \frac{m_A + m_B + m_C}{\frac{m_A}{\rho_A} + \frac{m_B}{\rho_B} + \frac{m_C}{\rho_C}} = \frac{(m_A + m_B + m_C) \cdot \rho_A \cdot \rho_B \cdot \rho_C}{m_A \cdot \rho_B \cdot \rho_C + m_B \cdot \rho_A \cdot \rho_C + m_C \cdot \rho_A \cdot \rho_B} =$$

$$= \frac{1}{W_A \cdot \rho_B \cdot \rho_C + W_B \cdot \rho_A \cdot \rho_C + W_C \cdot \rho_A \cdot \rho_B} = \frac{1}{\frac{W_A}{\rho_A} + \frac{W_B}{\rho_B} + \frac{W_C}{\rho_C}} \quad (\text{E 60})$$

8.7 Anexo 7. Deducciones de las entalpías parciales

Proveniente de la bibliográfica, de forma general, la entalpía respecto a la temperatura y la concentración de zumo de granada es la siguiente ecuación (E 61)[31].

$$h_z(T, W) = K_a + (K_b + K_c \cdot W) \cdot T + (K_d + K_e \cdot W) \cdot T^2 \quad (\text{E 61})$$

Realizando las derivadas parciales a la anterior ecuación resultan estas ecuaciones

$$\frac{\partial h_z}{\partial T} = K_b + K_c \cdot W + 2 \cdot (K_d + K_e \cdot W) \cdot T \quad (\text{E 62})$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial W} = K_c \cdot T + K_e \cdot T^2 \quad (\text{E 63})$$

Entalpía del agua saturada respecto a la temperatura, obtenida por regresión lineal de los datos obtenidos en la Tabla 24.

$$h_{w,l,b}(T) = K_f \cdot T^2 + K_g \cdot T + K_h \quad (\text{E 64})$$

Utilizando ‘solver’ se realiza una regresión lineal a la que se le fijan los parámetros de la ecuación anterior para que se cumpla que cuando no existe presencia de concentración de zumo en el agua se dé la entalpía del agua correspondiente.

8.8 Anexo 8: Constantes de las ecuaciones

Tabla 26. Constantes

Constante	Valor	Constante	Valor
K_1	$2,2090 \cdot 10^{-1}$	K_{17}	$1,5562 \cdot 10^{-3}$
K_2	$5,5700 \cdot 10^{-2}$	K_{18}	-3,7480
K_3	$-5,0850 \cdot 10^{-7}$	K_{19}	$2,6263 \cdot 10^3$
K_4	$8,3949 \cdot 10^{-4}$	K_{20}	$-2,7623 \cdot 10^{-3}$
K_5	$-5,1350 \cdot 10^{-1}$	K_{21}	1,3494
K_6	$1,3477 \cdot 10^2$	K_{22}	$8,3981 \cdot 10^2$
K_7	$-1,0308 \cdot 10^4$	K_{23}	4,1800
K_8	$1,6425 \cdot 10^{-9}$	K_{24}	-2,5075
K_9	$-3,5412 \cdot 10^{-6}$	K_{25}	$1,7141 \cdot 10^{-4}$
K_{10}	$3,0065 \cdot 10^{-3}$	K_{26}	$7,3305 \cdot 10^{-3}$
K_{11}	-1,2545	K_{27}	-2,5075
K_{12}	$2,6102 \cdot 10^2$	K_{28}	$3,6652 \cdot 10^{-3}$
K_{13}	$-2,1792 \cdot 10^4$	K_f	$8,5704 \cdot 10^{-5}$
K_{14}	$-7,2269 \cdot 10^{-5}$	K_g	4,1800
K_{15}	$-8,9896 \cdot 10^{-1}$	K_h	$1,6025 \cdot 10^{-1}$
K_{16}	$1,7542 \cdot 10^3$		

8.9 Anexo 9: Calor específicos de vapor saturado de agua

Tabla 27. Calor específico de vapor saturado de agua [21]

T (K)	C_{pv} (kJ/kg K)	T K	C_{pv} (kJ/kg K)	T K	C_{pv} (kJ/kg K)
273,15	1,854	320	1,895	370	2,017
275	1,855	325	1,903	373,15	2,029
280	1,858	330	1,911	375	2,036
285	1,861	335	1,92	380	2,057
290	1,864	340	1,93	385	2,08
295	1,868	345	1,941	390	2,104
300	1,872	350	1,954	400	2,158
305	1,877	355	1,968	410	2,221
310	1,882	360	1,983	420	2,291
315	1,888	365	1,999	430	2,369