

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA DE LA SAVIA EXTRAÍDA DEL AGAVE AZUL (*Agave americana*)

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Autor: Alexander José Bosque Chorlango

Director: Ing. Juan Carlos De la Vega Quintero, MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:		1724840671	
APELLIDOS Y NOMBRES:		Bosque Chorlango Alexander José	
DIRECCIÓN:		Pichincha, Pedro Moncayo, Tabacundo, Calle José Catucuago y pasaje 28 de abril	
EMAIL:		ajbosquec@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	(02) 2367141	TELÉFONO	0969900082
		MÓVIL:	
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:		Simulación computacional del proceso de fermentación alcohólica de la savia extraída del agave azul (<i>Agave americana</i>)	
AUTOR:		Bosque Chorlango Alexander José	
FECHA:		17/04/2023	
PROGRAMA:	X PREGRADO	POSGRADO	
TÍTULO POR EL QUE OPTA:		Ingeniero Agroindustrial	
DIRECTOR:		Ing. Juan Carlos De La Vega Quintero, MSc	

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamo por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de abril del 2023

EL AUTOR:

Firma.....

Bosque Chorlango Alexander José

C.I.: 1724840671

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Alexander José Bosque Chorlango, con cédula de ciudadanía 1724840671, bajo mi supervisión.


.....

Ing. Juan Carlos De La Vega Quintero M.Sc.
DIRECTOR DE TESIS

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “Simulación Computacional del proceso de fermentación alcohólica de la savia extraída del agave azul (*Agave americana*)” elaborado por el Sr. Alexander José Bosque Chorlango, previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:


.....
Ing. Juan Carlos De La Vega Quintero M.Sc.
DIRECTOR


.....
Ing. Jimmy Núñez Pérez M.Sc.
ASESOR


.....
Ing. Juan Fernando Guamán Tabango M.Sc.
ASESOR

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a todos quienes formaron parte de esta investigación y contribuyeron para que sea posible.

*A mi primera familia, mis padres Alberto y Carmencita por ser las personas que siempre estuvieron ahí cuando los necesite, aconsejándome para llegar a ser la persona hoy en día soy, darles las gracias infinitamente, ya que no teníamos lujos económicos pero **NUNCA NOS HIZO FALTA ABSOLUTAMENTE NADA**, y a la vez al regalarnos el mayor lujo y enseñanza posible, que una familia se construye a base de comprensión y mucho amor, que las cosas materiales quedan en segundo plano y el dinero siempre va y viene, a mis hermanos, Emerson, Anderson y Maythe por ser las personas que me motivaron a llegar a meta.*

A mi segunda familia, Nancy, José y Camila, los cuales llegaron a mi vida o yo llegué a ellos, cuando era todo un adolescente, pero me supieron recibir en su hogar como un hijo más de toda la vida, compartiendo muchos momentos muy amenos. ¡Gracias infinitamente!

A todos los docentes de la Universidad Técnica del Norte que contribuyeron en mi formación académica y por los consejos de vida que en su momento me supieron compartir. A la Asociación ANAGAVEC, con la cual se trabajó en este proyecto.

José

DEDICATORIA

Esta dedicatoria es en especial es para mis abuelitos Isabel y Gaspar que en paz descansan, personas con quienes compartí toda la vida y las cuales formaron mi carácter. A mi hermanita de mi alma que también está junto a Diosito, tú fuiste el pilar fundamental para llegar al objetivo planteado desde el primer día que pise la universidad.

A toda mi familia que en su momento supo darme su apoyo incondicional.

José

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
RESUMEN	vi
SUMMARY	vii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 HIPÓTESIS	3
1.4.1 HIPÓTESIS ALTERNATIVA	3
1.4.2 HIPÓTESIS NULA	3
CAPÍTULO II	42
MARCO TEÓRICO	42
2.1 AGAVE AZUL	42
2.1.1 ORIGEN Y DOMESTICACIÓN DEL AGAVE	43
2.1.2 CLASIFICACIÓN BOTÁNICA DEL AGAVE AZUL	44
2.1.3 USOS DEL AGAVE EN ECUADOR	44
2.2 SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE	46
2.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA	48
2.2.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN	49
2.3 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	50
2.4 BEBIDAS ALCOHÓLICAS	52
2.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS BEBIDAS ALCOHÓLICAS	52
2.5 BIORREACTOR	53
2.5.1 TIPOS DE BIORREACTORES	54
2.6 SIMULACIÓN MATEMÁTICA	56

2.6.1	CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	57
2.6.2	MODELO SEMIFÍSICO DE BASE FENOMENOLÓGICA (MSBF) .	58
2.7	MATLAB	61
2.7.1	ANÁLISIS DE DATOS.....	62
2.7.2	RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	63
2.8	SIMULINK	64
2.9	SYSTEM IDENTIFICATION	66
2.10	DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS	66
2.11	PRUEBA t – STUDENT.....	68
CAPÍTULO III.....		69
MATERIALES Y MÉTODOS		69
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	69
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS.....	70
3.3	Metodología	71
3.3.1	Descripción de las variables a evaluarse.....	71
3.3.1	ESTABLECER UN MODELO DE BASE FENOMENOLÓGICA PARA LA SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE	73
3.3.2	ANALIZAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN POR LOTES A TRAVÉS DE MATRIX LABORATORY (MATLAB)	74
3.3.3	COMPARAR LA CANTIDAD DE PRODUCTO GENERADO EN LA SIMULACIÓN CON LOS TRABAJOS HECHOS EN CAMPO.....	76
3.4	MANEJO ESPECÍFICO DEL EXPERIMENTO	77
3.4.1	DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS.....	77
3.5	DESCRIPCIÓN DIAGRAMA DE PROCESO.....	77
3.5.1	Recepción de materia prima.....	77
3.5.2	Control de calidad.....	78
3.5.3	Filtrado.....	78
3.5.4	Pasteurización	78
3.5.5	Inoculación	78
3.5.6	Fermentación.....	79
3.5.7	Filtración	79
3.5.8	Destilación	79
3.5.9	Dilución, envasado y almacenamiento.	79
	Análisis de datos	80

3.5.10 Base de datos	80
3.5.11 Análisis	80
3.5.12 Resultados	80
CAPÍTULO IV	81
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1 PRETRATAMIENTO DE DATOS	81
4.2 ESTABLECER UN MODELO DE BASE FENOMENOLÓGICA PARA LA SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE	81
4.3 ANALIZAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN POR LOTES A TRAVÉS DE MATRIX LABORATORY (MATLAB)	85
4.4 CANTIDAD DE PRODUCTO GENERADO EN LA SIMULACIÓN CON LOS TRABAJOS HECHOS EN CAMPO	93
CAPÍTULO V	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
5.1 CONCLUSIONES	95
5.2 RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agave azul (Mishky Huarmy, 2019).....	43
Figura 2. Cristales de agave (Mishky Huarmy, 2019)	45
Figura 3. El penco, partes y usos (Freile & Garcés, 2017)	46
Figura 4. Savia de agave (Correa, 2019).....	47
Figura 5. Extracción de la savia de agave (Heraldo, 2014)	49
Figura 6. RDTA (Barba & Clausell, 2014)	55
Figura 7. RSTA (Barba & Clausell, 2014).....	55
Figura 8. RCTA (Barba & Clausell, 2014)	56
Figura 9. RFP (Barba & Clausell, 2014).....	56
Figura 10. Proceso de modelado Brito et al. (2011).....	57
Figura 11. Diagrama de bloques de Simulink (MathWorks)	65
Figura 12. System Identification (MathWorks, 2022)	66
Figura 13. Representación de la distribución de la prueba T Student	68
Figura 14. Definición del sistema.....	71
Figura 15. Diagrama de proceso.....	77
Figura 16. Control de calidad de la materia prima.....	78
Figura 17. Inoculo	78
Figura 18. Etapa de fermentación.....	79
Figura 19. Comportamiento de etanol en el tiempo	82
Figura 20. Tendencia del etanol en el tiempo.....	83
Figura 21. Gráfica de comportamiento de alcohol en el tiempo	84
Figura 22. Comportamiento de etanol en el tiempo	85
Figura 23. Comportamiento de los sólidos solubles	86
Figura 24. Comportamiento del pH	87
Figura 25. Comportamiento de la temperatura	88
Figura 26. Comportamiento de la biomasa	89
Figura 27. Sistema de fermentación de la savia extraída del agave azul.	90
Figura 28. Comportamiento de la producción de alcohol en campo y simulado. 93	
Figura 29. Gráfico de comparación del rendimiento de etanol simulado vs trabajos en campo.....	94
Figura 30. Diagrama del objeto en estudio.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación botánica del agave.....	44
Tabla 2. Composición química en 100 g de muestra.....	48
Tabla 3. Frecuencia de cosecha por día	50
Tabla 4. Nomenclatura para la construcción de DFD.....	67
Tabla 5. Localización de la fase experimental	69
Tabla 6. Localización del Laboratorio de Bioprocesos Agroindustriales	70

RESUMEN

El presente trabajo tuvo la finalidad de presentar una alternativa de abarcar problemas de la ingeniería a través de la modelación matemática, con aplicación en la fermentación por lotes del jugo de agave en la producción de etanol. La savia fue previamente pasteurizada de (60 a 65) °C por 15 minutos e inoculado con levadura Saf Spirit M-1. Las variables cuantificadas durante el proceso fueron: sólidos solubles, pH, temperatura, concentración celular y alcohol en intervalos de 30 minutos para construir la base de datos del sistema a modelar a través de Matlab. Estos valores fueron analizados en System Identification, obteniendo cuatro funciones de transferencia con FIT del 96.91, 92.16, 94.3 y 93.5 % que describen el proceso. Luego los modelos se resolvieron en Simulink para visualizar la producción de alcohol, llegando a predecir una concentración de alcohol del 7.90 %, que comparado con el valor estequiométrico (7.80 %) y el valor en campo (7.70 %), no presento diferencia significativa. De esta manera se concluye que el modelo se asemeja con la realidad en un 94.22 % a través del FIT y con un 95 % de confianza al realizar la prueba t-Student, demostrando a través de la correlación de Fisher que el método generado presenta una alta representación del sistema de estudio

Palabras clave: FIT, System Identification, Simulink, función de transferencia.

SUMMARY

This research's purpose was to propose an alternative to approach engineering problems through mathematical modeling, with application in agave-juice batch fermentation in ethanol production. The sap was previously pasteurized (60 to 65 °C) for 15 minutes and inoculated with Saf Spirit M-1 yeast. The variables quantified during the process were: soluble solids, pH, temperature, cell concentration and alcohol at 30 minutes intervals to build the System Identification, obtaining four transfer functions with FIT of 96.91 %, 92.16 %, 94.3 % and 93.5 % that describe the process. Then, these models were solved in Simulink to visualize the alcohol production, being possible to predict an alcohol concentration of 7.90 %, which, in comparison with the stoichiometry value (7.80 %) and the field value (7.70 %), did not show any meaningful difference. In conclusion, the model resembles reality in 94.22 % through the FIT and with a 95 % of confidence when performing the t-Student test, demonstrating through Fisher correlation that the generated presents a high representation of the system under study.

Keywords: FIT, System Identification, Simulink, Transfer function.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA

Los bioprocesos al no ser estandarizados conllevan a múltiples problemas, como es el comportamiento irregular de la etapa fermentativa, por lo cual ocasiona variabilidad de la calidad en el producto final y afecta la rentabilidad de una empresa.

La fermentación es el proceso más crítico en la elaboración de bebidas alcohólicas ya sean fermentadas o destiladas (López, Zumalacárregui, & Pérez, 2019), la eficiencia en la producción de etanol y compuestos aromáticos varía en dependencia de las condiciones fermentativas, cepa utilizada, composición y concentración del mosto, siendo variables que afectan la conversión de azúcares a etanol (Tellez, Peraza, Feria, & Andrade, 2012).

La experimentación en tiempo real requiere de grandes inversiones económicas, personal con experiencia, tiempos prolongados en investigaciones, además la simulación de los procesos biotecnológicos es reducida, debido a la limitada información y desconocimiento de herramientas informáticas aplicables en la modelación de las áreas biológicas que permitan obtener predicciones de comportamiento y parámetros a controlar en campo sin necesidad de realizar pruebas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los avances tecnológicos en computación permiten el desarrollo de programas que están basados en fórmulas, ecuaciones y modelos matemáticos para la simulación de procesos, lo cual adquiere gran importancia, permitiendo realizar un trabajo con mayor rigurosidad en cualquier instante, reduciendo los costos de experimentación (recurso humano, material, económico) y tiempos de investigación.

Con datos calculados en la microempresa Indeslae y los reportados por ANAGAVEC, el presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de la herramienta MATrix LABoratory (MATLAB) en la simulación del proceso de fermentación para la producción de alcohol etílico.

La utilización de diferentes softwares ha hecho posible que las empresas desarrollen simuladores de procesos determinados, a través de ello se puede conocer su comportamiento, predicción y análisis en corto tiempo, a su vez, permite la estandarización, optimización y automatización de bioprocesos (Koutinas, Kiparissides, Pistikopoulos, & Mantalaris, 2012), (Ortega, Pérez, & López, 2016). También se aborda problemas de la ingeniería de forma neutral y organizada, sin ser expertos en el proceso a modelar, únicamente partiendo de los recursos que intervienen, conocimientos de la termodinámica, fenómenos de transporte y operaciones unitarias que ocurren dentro del sistema (Ribas et al., 2011).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Simular la fermentación alcohólica de la savia extraída de agave azul (*Agave americana*)

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un Modelo de Base Fenomenológica para la savia extraída de agave.
- Analizar el proceso de fermentación por lotes a través de MATrix LABoratory (MATLAB).
- Comparar la cantidad de producto generado en la simulación con los trabajos hechos en campo.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 HIPÓTESIS ALTERNATIVA

Ha: A partir del modelo de base fenomenológico se puede desarrollar un modelo computacional.

1.4.2 HIPÓTESIS NULA

Ho: A partir del modelo de base fenomenológico no se puede desarrollar un modelo computacional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 AGAVE AZUL

Los nativos toltecas, mayas y aztecas nombraron a estas plantas como: cabuyas, pencos y magueyes, las cuales son de hojas carnosas, tallo largo central y robusto, poseedora de grandes cualidades alimenticias y medicinales (Naranjo, 2012).

De acuerdo con García, Méndez & Talavera (2010), los agaves son plantas de características fisiológicas y morfológicas únicas que les permiten adaptarse en diferentes ambientes ya sean valles, planicies, desniveles (laderas) del terreno, también en lugares hostiles (suelos pedregosos). Castro & Guerrero (2013) mencionan, los climas que favorecen la reproducción y desarrollo son el árido y semiárido; por lo cual, es característico encontrar magueyes en estas zonas.

Según la Asociación Nacional de las Cadenas Productivas del Penco y Cabuya del Ecuador (ANAGAVEC), el agave azul se encuentra entre los 1600 y 3200 metros sobre el nivel mar, a lo largo del callejón interandino; específicamente en las provincias de Loja, Azuay, Cañar, Bolívar, Tungurahua, Cotopaxi, Chimborazo, Pichincha, Imbabura y Carchi.

Son plantas de 2 m de alto; que poseen hojas verdes – azuladas con espinas en el borde y la punta, las cuales adquieren forma de roseta (figura 1); el tallo se desarrolla en la parte central de la planta, llegando a medir hasta 10 m de alto; las flores son amarillas – verdosas en forma de racimo, la mismas que florecen una vez, cuando la planta ha madurado por completo (10 – 20 años), posterior a ello la especie vegetal muere (Eynden, Cueva, & Cabrera, 1998).



Figura 1. Agave azul (Mishky Huarmy, 2019)

2.1.1 ORIGEN Y DOMESTICACIÓN DEL AGAVE

El género *Agave* con más de 200 especies, es el más abundante de la familia *Agavaceae*. El 75 % de las especies se encuentran en México, por lo cual se considera como el centro de origen y diversificación (Vázquez, Cházaro, & Hernández, 2007), distribuyéndose desde los 34° latitud norte hasta los 60° latitud sur (García et al., 2010).

Según García et al. (2017) los diversos usos de los magueyes datan hacen, aproximadamente 10 000 años. García (2007), menciona que, los pueblos de Mesoamérica, al aprovechar las diferentes especies de agaves, hicieron su centro de domesticación mediante la selección humana. Escogían las especies por sus características alimenticias, disponibilidad de fibras y aguamiel (jugo).

La domesticación en base al alimento fue mediante las características de tamaño, concentración de energía (carbohidratos) en las hojas, sabor del tallo y pedúnculo

(inflorescencia). Estas estructuras morfológicas se aprovechan al final del ciclo de vida y han sido utilizados ampliamente en la región denominada Aridoamérica; como fuente de fibra, fueron seleccionadas de acuerdo a la longitud y ancho de la hoja, cantidad y resistencia de las fibras, en dependencia de su empleo en la elaboración de vestimentas, costales, sogas y cordeles hasta que en los años cincuenta empezaron a sustituirse por plástico; y finalmente para jugo, se seleccionó según el tamaño de la roseta y savia con mayor concentración de azúcares y propiedades organolépticas deseables para la elaboración de bebidas sin fermentar o fermentadas (García et al., 2017), es así, como los pueblos indígenas han contribuido en la evolución de estas plantas.

2.1.2 CLASIFICACIÓN BOTÁNICA DEL AGAVE AZUL

Hristov (citado en Jurado & Sarzosa, 2009) menciona que el nombre científico *Agave americana* L; fue publicado por primera vez en “Species plantarum” por Carl Linné en 1753 y validada por él hasta 1754. En la tabla 1 se detalla la clasificación botánica del agave azul.

Tabla 1. Clasificación botánica del agave

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Asparagales
Familia	Agavaceae
Género	Agave
Especie	Americana

Fuente: (Villacrés, 2018)

2.1.3 USOS DEL AGAVE EN ECUADOR

El uso del penco en el Ecuador es muy antiguo, De la Torre (2017) y ANAGAVE (2020), mencionan su principal aplicación es en la extracción de jugo (savia), este líquido se obtiene de pencos que han acumulado agua y azúcares durante toda su vida. Antiguamente era utilizado como edulcorante antes de la llegada de la caña

de azúcar y en épocas de sequía extrema, era fuente de agua; y en la actualidad se utiliza en la producción de sirope o dulce de cabuya, el cual se realiza mediante concentración del jugo y como bebida alcohólica ya sea únicamente fermentada (guarango) o destilada (licor de agave – MISKE). Los cristales de agave es otro de los usos más comunes (figura 2), también se emplea en la elaboración de jarabes fructosados, azúcares que sirvan como edulcorantes naturales para diabéticos (Márquez, Rodríguez, Herrera, Contreras, & Aguilar, 2013).



Figura 2. Cristales de agave (Mishky Huarmy, 2019)

De la Torre (2017), menciona diferentes usos dependiendo la parte del maguey (figura 3), las hojas troceadas se utilizan como alimento para animales y en la producción de fibra para elaborar vestimenta, calzado, redes de pesca y cacería, aunque poco a poco han sido reemplazados por material sintético. El tallo troceado se aprovecha como fertilizante y las alcaparras (envoltura que contiene la flor) se utilizan para la elaboración de encurtidos en la industria alimentaria.

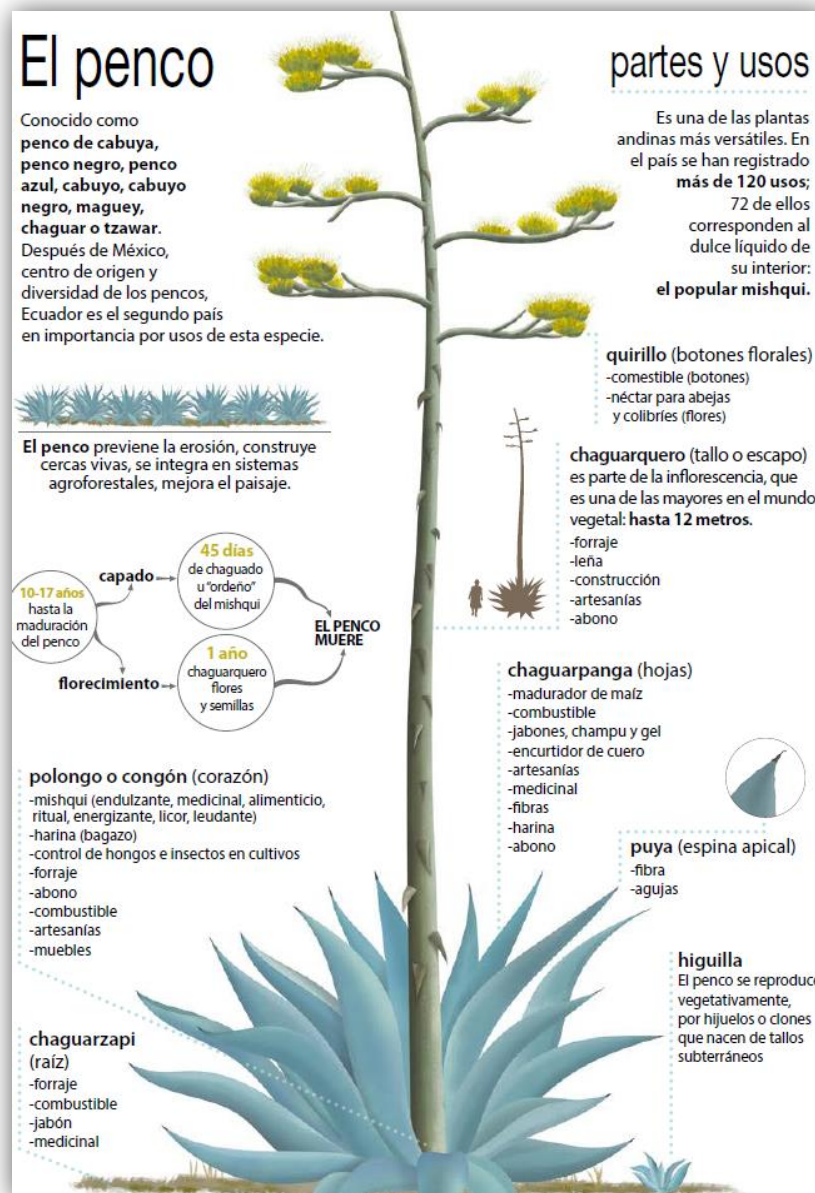


Figura 3. El penco, partes y usos (Freile & Garcés, 2017)

2.2 SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE

Registros bibliográficos se refieren a que un indígena llamado Papantzin descubrió esta bebida, cuando observó en su huerto como un roedor de campo perpetraba un orificio en el centro del agave y de él escurría un líquido muy dulce, al cual posteriormente lo denominaron “aguamiel” (Naranjo, 2012).

En el Ecuador es más conocido como chaguarmishqui, la cual es una palabra en el idioma en castellano, que a su vez está compuesta de la unión de dos vocablos que son Chaguar = Penco y mishqui = Duce (Figura 4), por lo tanto, significa dulce de penco (Cobo, 2016).



Figura 4. Savia de agave (Correa, 2019)

Su principal uso radica en la producción de bebidas alcohólicas fermentadas o destiladas, según Escalante et al. (2004), la fermentación inicia en el propio agave, donde se encuentran microorganismos autóctonos que fermentan parte de los carbohidratos, sin embargo, el proceso se acelera mediante la adición de inóculos como es la semilla (parte del licor de penco fermentado previamente) y mediante la agregación de levaduras del género *Saccharomyces cerevisiae* las cuales son ampliamente utilizadas en la producción de alcohol.

Según Nobel (1998), la bebida de agave más antigua que se produce hasta la actualidad es el pulque, conocido por los aztecas desde el siglo XIII y por sus antecesores hace más de mil años. De acuerdo con Guzmán & Contreras (2018), es el aguamiel o savia extraída de diversas especies de agaves y posteriormente fermentada, proceso que dura varias horas, dependiendo de la calidad del jugo. Es de color blanco, olor y sabor característicos al penco.

2.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA

El aguamiel está compuesto principalmente por gran cantidad de azúcares fermentables, polifruktanos, (Valadez, Bravo, Santos, Velasco, & Montville, 2012) y (Márquez et al., 2013), además es rico en carbohidratos como inulina, también contiene aminoácidos, proteínas y vitaminas (Flores, Mora, & Romero, 2008). Minerales como potasio, calcio y fósforo en mayor concentración (Chagua, Malpartida, & Ruíz, 2020) . En la tabla 2 se detalla la composición química del jugo de agave.

De acuerdo con Márquez et al. (2013), Guamán & Contreras (2018), el jugo contiene compuestos nutraceuticos, especialmente oligosacáridos que actúan como prebióticos y antioxidantes naturales, además de bioactivos, ácidos grasos que le hacen un alimento con propiedades funcionales.

Tabla 2. Composición química en 100 g de muestra

Composición	Unidad	Bautista & Arias (2008)	Flores, Mora & Romero (2008)	Morales, Bourges & Camacho (2015)
Humedad	(%)	87.38	86.00	97.30 g
Densidad	(g*L ⁻¹)	1.00226	1.231	-
ph		7.72	6.6	-
Proteína	g	0.30	2.49 (g*L ⁻¹)	0.20
Extracto etéreo	g	0.01	-	0.00
Cenizas	g	0.23	0.48	0.20
Azúcares	%	9.80	12.67 °Brix	-
Energía	Kcal	37.28	-	10.04
Azúcares reductores	(g.L ⁻¹)	0.97	1.069	-
Calcio	mg	9.70	-	10.00
Fósforo	mg	4.20	-	5.00
Potasio	mg	14.56	-	-
Niacina	mg	-	-	0.14
Ácido Ascórbico	mg	-	-	4.60

Fuente. Elaborado por el autor

2.2.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN

De acuerdo con ANAGAVEC (2020) y Nobel (1998), para la extracción del jugo se deben seleccionar plantas de 10 a 12 años cuando son nativas o silvestres, en semicultivo (mínimo manejo de la especie vegetal en campo) de 8 a 10 años y en cultivos entre 7 u 8 años, inclusive menos dependiendo de la ubicación geográfica, preparación del suelo, riego, fertilización, densidad de siembra.

Ramírez & Williams (2003), Jurado & Sarzosa (2009) detallan que su obtención es laboriosa; generalmente el lugar a realizar la cavidad se ubica en el sexto lugar, contando en forma vertical desde la hoja más cercana al suelo. El orificio construido en forma de pozo (figura 5), se deja reposar durante tres días con agua, proceso cumple la función de contrarrestar la cristalización de las paredes internas y facilita la exudación del aguamiel.



Figura 5. Extracción de la savia de agave (Heraldo, 2014)

Dependiendo de la edad, tamaño del maguey, y diámetro de la cavidad de acumulación, se podrá recolectar todos los días de 0.5 a 3 litros por planta en tres turnos (tabla 3). Después de cada recolección es indispensable raspar las paredes del orificio para evitar la cicatrización de las mimas y continuar con la exudación. La cosecha dura entre uno y seis meses, hasta que la planta se haya secado por completo (Jurado & Sarzosa, 2009).

Tabla 3. Frecuencia de cosecha por día

Cosecha	Hora
1	6:00 a 8:00 am
2	12:00 a 13:00 pm
3	17:00 a 18:00 pm

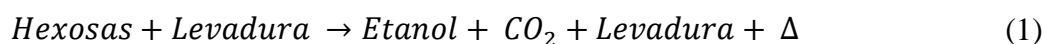
Fuente: (Jurado & Sarzosa, 2009)

Según ANAGAVE (2020), la producción de la savia (chaguarmishqui) hasta el año 2019 fue aproximadamente de 360 000 litros, cifra que va en aumento gracias al desarrollo de técnicas agronómicas, con densidades de siembra con 2200 plantas por hectárea con rendimientos promedio de 150 litros por cada especie vegetal.

2.3 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Según Escalante et al. (2014), la fermentación alcohólica es la conversión de los azúcares presentes en un sustrato a etanol, CO₂ y en una variedad de compuestos volátiles y no volátiles que contribuyen con las características sensoriales de las bebidas fermentadas o destiladas, siendo el grupo de los ésteres con mayor presencia de compuestos aromáticos. Zamora (2009), menciona que estos procesos de transformación pueden ser a través de las levaduras y algunas bacterias como la *Zymomonas mobilis*.

García y Estévez (citado en Suárez, Garrido & Guevara, 2016), describen el proceso de producción de alcohol mediante fermentación a través de la conversión de hexosas en etanol por medio de la ecuación (1).



El rendimiento teórico para la transformación de hexosas en etanol es de 0.511 g de C₂H₅OH y 0.489 g de CO₂ por cada gramo de C₆H₁₂O₆, este valor fue cuantificado por Gay Lussac. En la realidad es improbable llegar a este rendimiento debido a que la levadura utiliza la glucosa para la producción de otros metabolitos (ésteres, alcoholes superiores, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, etc.). Los valores alcanzados experimentalmente varían entre 90 y 95 % (0.469 a 0.485 g/g)

del teórico, mientras que, en la industria generalmente se reflejan valores entre 87 y 93% respecto al ideal Boudarel (citado por Vázquez & Dacosta, 2007), debido a la naturaleza biológica del proceso y parámetros operacionales como:

- El pH, según Suárez et al. (2016), el óptimo para que se desarrollen mejor los microorganismos está entre 4 y 5. Las levaduras tienen la ventaja de soportar, medios más ácidos, por lo cual es aprovechado en los procesos industriales para mantener el medio controlado de bacterias que puedan competir por el sustrato.
- Las altas temperaturas ocasionan una disminución de la biomasa, producto de la desnaturalización de proteínas y aminoácidos libres e induce a la rigidez de la membrana celular. Temperaturas muy bajas provocan un estado de latencia en la célula, deteniendo su desarrollo (Suárez et al., 2016).
- Según Argote y otros (2015), el microorganismo más utilizado para la producción de alcohol es la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, que convierte las hexosas a etanol en condiciones anaerobias, además tienen la característica de soportar elevadas concentraciones de alcohol ($150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).
- La luz según Suárez et al. (2016), es perjudicial para los microorganismos que carecen de clorofila, o cualquier otro pigmento que les permita usar la energía de las radiaciones en el proceso de fotosíntesis.
- La ausencia o abundancia de oxígeno permite una selección tanto de microorganismo como de productos. Cuando el cultivo se produce en presencia de oxígeno molecular, se denomina fermentación aeróbica y se caracteriza por la producción de biomasa, mientras que, en ausencia de O_2 se denomina fermentación anaeróbica, siendo generalmente utilizada en la producción de alcohol etílico (Nieto, 2009).
- La concentración de etanol es una combinación de inhibición del crecimiento y disminución de la viabilidad (número de células vivas). Actúa como inhibidor del mismo proceso a partir del 8 % de concentración (Suárez et al., 2016); en los últimos años se han logrado obtener cepas que soportan concentraciones hasta el 18 %.

2.4 BEBIDAS ALCOHÓLICAS

La fabricación y consumo de bebidas alcohólicas han formado parte de la civilización humana durante miles de años, según el INEN (1992), son productos aptos para el consumo humano, proveniente de la fermentación, destilación, preparación o mezcla de los mismos, de origen vegetal y salvo preparaciones farmacéuticas.

Son apetecidas por el contenido alcohólico y sus características organolépticas, particularidades que están estrictamente relacionadas con la materia prima e inóculos (levaduras del género *Saccharomyces*) que realizan la fermentación. Los aromas y sabores son el resultado de los diferentes metabolitos que producen cada cepa, estos pueden ser ésteres, ácidos orgánicos, carbonilos, etc. (Casas, et al., 2015).

Según Casas et al. (2015), las levaduras no *Saccharomyces* juegan un papel importante en la producción de bebidas alcohólicas, ya que participan en la fermentación, y aportan la mayoría de las características organolépticas, también pueden enriquecer nutricionalmente los mostos, lo que ayuda a satisfacer el paladar de los consumidores.

2.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS BEBIDAS ALCOHÓLICAS

Las bebidas alcohólicas se clasifican de forma más general por su procedencia en las siguientes:

- Bebidas destiladas o espirituosas. Se obtienen a partir de los mostos previamente fermentados, mediante la aplicación de calor se produce la separación del alcohol y sustancias volátiles de la solución original debido al cambio de estado líquido a vapor. (Buitrago, Martís, & Pulido, 2016).

Según Muñoz (2010), destilación se remota a épocas anteriores al año 800 antes de Cristo (a.C.), este proceso se basa en los distintos puntos de ebullición de los compuestos que constituyen la solución, pasando de la fase

líquida a vapor a diferentes temperaturas (Martín, Buitrago, & Pulido, 2016).

Los primeros destilados se conocieron con el nombre de aguavite (aguardiente). Hasta aproximadamente un siglo, únicamente se extraía etanol del vino, pero la creciente demanda y diversidad de aplicaciones, obligó a buscar este producto en más especies vegetales, hoy en día su principal fuente de elaboración son los cereales y la caña o melaza de azúcar (Muñoz, 2010). Algunos ejemplos de bebidas alcohólicas destiladas son: brandy, tequila, whisky, ron, vodka, ginebra, pisco, miske, aguardiente, etc.

- Bebidas fermentadas, según el INEN (1992) afirma que: “es la bebida obtenida de mostos fermentados sin destilación” (pág.3). El proceso de fermentación completo e incompleto es producido por acción de las enzimas que ocasionan cambios químicos en las sustancias orgánicas complejas en otras simples; son utilizados en la elaboración de champagne, pulque, cava, sidra, vermut, sake, pulque y principalmente en la producción de cerveza y distintos vinos (Muñoz, 2010).

Según Muñoz (2010), la producción de cerveza por acción de la levadura convierte azúcares simples (glucosa y fructosa) en alcohol etílico, compuestos aromáticos y dióxido de carbono, mientras que, en los vinos, la química de la fermentación es la derivación del dióxido de carbono del aire que penetra las hojas del viñedo y luego es convertido en almidones y sus derivados.

2.5 BIORREACTOR

También llamado fermentador, es un sistema que mantiene las condiciones idóneas para un ambiente microbiológicamente activo, en el cual se llevan a cabo reacciones biológicas y químicas que originan el cambio de al menos una de las propiedades de la materia.

Abuámer (2007) menciona que: los sistemas o métodos de cultivos, hacen referencia al modo de operar un biorreactor en forma discontinua, semicontinua y

continua. Para un componente cualquiera de la solución se puede plantear ecuación (2) de balance de materia en el equipo.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Acumulación} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Ingreso} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Salida} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Formación} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Consumo} \end{array} \right) \quad (2)$$

2.5.1 TIPOS DE BIORREACTORES

Se acuerdo con Barba & Clausell (2014) lo clasifican en base a dos criterios:

Según el modo de operación.

Reactores discontinuos. Funcionan en régimen no estacionario, ya que la composición y propiedades físicas de la mezcla de reacción varían con el tiempo de operación. Son utilizados para realizar investigaciones de nuevos procesos químicos, fabricaciones de pequeñas cantidades de producto con alto valor agregado.

Reactores continuos. Funcionan en régimen estacionario, ya que la composición y las propiedades físicas de la mezcla de reacción en ningún caso varían con el tiempo. Se utilizan para llevar a cabo reacciones a gran escala y automatización de proceso, permitiendo condiciones de operación constantes.

Según el modelo de flujo y contacto de la mezcla de reacción.

Reactor Discontinuo Tipo Tanque Agitado (RDTA), figura 6; Conocido también como Batch Reactor. Se caracteriza por presentar agitación perfecta en la mezcla; mantiene el volumen constante debido a la carga de la solución al inicio de la operación; son utilizados en investigaciones cinéticas de laboratorios y aplicaciones en la industria farmacéutica, alimenticia, y biotecnológica. Su tiempo de operación es corto, por lo cual se puede asegurar condiciones asépticas en todo momento del proceso.

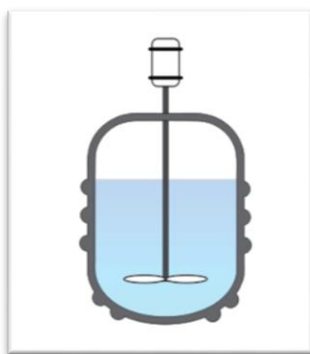


Figura 6. RDTA (Barba & Clausell, 2014)

Reactor Semicontinuo Tipo Tanque Agitado (RSTA), figura 7; Conocido también como Semibatch Reactor. Se caracteriza por la homogeneidad de la solución a fermentar, el volumen cambia con respecto al tiempo debido a las cargas sucesivas y el producto no se retira hasta finalizar el proceso de operación. Estos equipos permiten un mayor control de la concentración de nutrientes en el mosto.

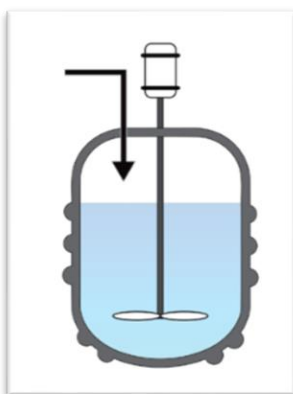


Figura 7. RSTA (Barba & Clausell, 2014)

Reactor Continuo Tipo Tanque Agitado (RCTA), figura 8; Conocido también como Batch Reactor. Se caracteriza por la concentración igual en cualquier punto del equipo; mantiene el volumen constante, ya que el flujo de entrada y salida son iguales; requiere de costos elevados para inicio del proceso. Este sistema permite la reducción de la mano obra y aumento de la productividad.

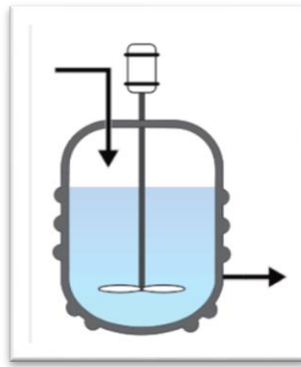


Figura 8. RCTA (Barba & Clausell, 2014)

Reactor Continuo Tubular de Flujo de Pistón (RFP), figura 9; Se caracteriza por no presentar mezcla longitudinal; trabaja en estado estacionario, al término de la acumulación desaparece en el balance; el flujo de entrada y salida son constantes y se usan para modelar transformaciones químicas.

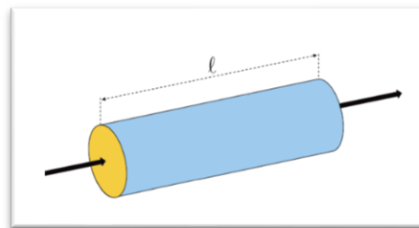


Figura 9. RFP (Barba & Clausell, 2014)

2.6 SIMULACIÓN MATEMÁTICA

Puppo (2008) lo define como: un procedimiento aplicable a una gama de problemas de diversa índole en matemáticas, física, química, ingeniería en general, economía, ciencias sociales y biológicas. Se basa en los números aleatorios puros, elegidos al azar; que consiste en la repetición de esquemas de cálculo basados en datos generados con dichos números, que responden a determinadas funciones de probabilidad.

Según Brito, Romero, Guerra, García & Arias (2011) es un intento por describir alguna parte del mundo real en términos matemáticos. Los modelos matemáticos han sido construidos en las ciencias físicas, químicas, biológicas y sociales; los elementos que constituyen son tomados del cálculo, el álgebra, geometría y todos los campos afines.

La simulación parte de un modelo matemático, Gómez, Calderón & Álvarez (2008) lo definen como: un conjunto de fórmulas matemáticas que representan la información y características más relevantes (de interés) de un proceso o sistema real para su estudio, el cual posee estructura y parámetros. La estructura es el conjunto de relaciones que gobiernan el modelo, mientras que los parámetros son valores numéricos que modifican las partes del modelo.

La modelación matemática, de acuerdo con Cruz (2010) y Brito et al. (2011), establecen un proceso de modelado (figura 10), el cual parte de un problema del mundo real; del cual se desconoce parcial o totalmente su comportamiento a través del tiempo o bajo la influencia de múltiples factores; la segunda etapa es el desarrollo de un modelo matemático, que describa sus características, en este punto se identifican y establecen variables, además las hipótesis que simplifiquen el fenómeno lo suficientemente para ser tratado en forma matemática. La tercera fase es dar una solución mediante algoritmos que resuelvan la o las ecuaciones generadas que rigen al proceso dado. Y por último es la predicción del modelo a través de la interpretación de los resultados obtenidos en el contexto anterior.

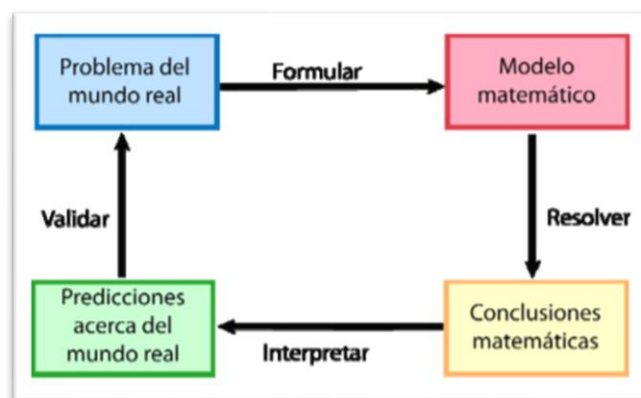


Figura 10. Proceso de modelado Brito et al. (2011)

2.6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Ribas, Hurtado, Garrido, Domenech & Sabadí (2011) lo clasifican en base a la ingeniería de procesos en los siguientes modelos:

- Modelos fenomenológicos. Conocidos también de caja blanca, es un modelo obtenido mediante estudio teórico del proceso; sus principios de

formulación son ecuaciones de conservación de la materia, energía y/o entropía, leyes generales y ecuaciones constitutivas. El grado de complejidad de este está delimitado por nivel de detalle y constituye el núcleo fundamental de los modelos utilizados por los ingenieros.

- Modelos empíricos. Se constituyen mediante experimentación y observación, haciendo luego uso de datos experimentales para ajustar los parámetros en una estructura matemática.
- Modelos Semifísicos. Conocidos como caja gris, es una combinación de los dos tipos anteriores, donde algunas características del proceso están descritas mediante correlaciones empíricas particulares para una condición dada. Estos modelos son utilizados cuando el conocimiento fenomenológico resulta insuficiente para describir la situación física del sistema que se modela.

2.6.2 MODELO SEMIFÍSICO DE BASE FENOMENOLÓGICA (MSBF)

En la actualidad los modelos semifísicos de base fenomenológica (MSBF) han demostrado gran utilidad por su capacidad de extrapolar los resultados a diferentes escalas y condiciones de operación, y pueden ser utilizados en diseño, optimización, control (automatización) y escalonado. Estos modelos se caracterizan por su universalidad, empleo de lenguaje preciso, de fácil manipulación analítica e implementación computacional (Ribas, Hurtado, Garrido, Domenech, & Sabadí, 2011), lo cual permite obtener resultados más precisos del modelo.

Gómez et al. (2008) y Alvarez, Lamanna, Vega & Revollar (2009) lo definen como: una estructura matemática que describe un sistema de proceso; Semifísico porque adiciona a la estructura ecuaciones empíricas para varios de sus parámetros que son denominadas ecuaciones constitutivas y de Base Fenomenológica porque toma fenómenos de transporte, tránsito, transferencia, y en el principio de conservación de la materia y energía.

Ribas et al. (2011) menciona que un MBF permite describir cómo una entidad cualquiera “z” que cambia o se mueve a través de una superficie con respecto al

tiempo y se puede cuantificar como (dz/dt). Por lo general estos modelos se utilizan en procesos químicos y biotecnológicos.

Sistema de proceso

Es la abstracción de una parte de todo el proceso a manera de un sistema, al cual se le puede aplicar todas las herramientas de representación y análisis mediante ecuaciones matemáticas.

Un sistema es el conjunto de reglas, principios, métodos, técnicas ordenadas con arreglo a una ley (estructura) para una finalidad determinada o función común de la salida del sistema, que resulta de la interacción parcial de los parámetros funcionales de los elementos, mientras que un proceso, son las operaciones o tratamientos de materia, energía e información, a fin de obtener un producto de características específicas (de interés) (Gómez et al., 2008).

Según Ribas et al. (2011), dentro de la fermentación, las entidades a modelar son; masa y energía, además se incluye la descripción cinética a nivel microorganismo y del biorreactor; la ecuación (3) de conservación aplica a un sistema dinámico:

$$\left(\begin{array}{c} \textit{Velocidad} \\ \textit{de} \\ \textit{Acumulación} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \textit{Velocidad} \\ \textit{de} \\ \textit{Transporte} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \textit{Velocidad} \\ \textit{Neta de} \\ \textit{Consumo} \end{array} \right) \quad (3)$$

La ecuación tendrá más términos constitutivos según el modo de operación; al transporte, están ligados los flujos de entrada y salida del sistema; y el consumo, hace referencia a los rendimientos de producción.

Balance de materia

$$\textit{(Acumulación)} = \left(\begin{array}{c} \textit{Generación} \\ \textit{por} \\ \textit{Reacción} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \textit{Flujo} \\ \textit{de} \\ \textit{Entrada} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \textit{Flujo} \\ \textit{de} \\ \textit{Salida} \end{array} \right) \quad (4)$$

Según Abuámer (2007), la ecuación (4) aplica para cada componente del sistema: biomasa, sustrato limitante y metabolitos (productos). Para un proceso discontinuo los flujos de entrada y salida son cero, por lo cual se reduce a la ecuación (5):

$$(Acumulación) = (Generación por Reacción) \quad (5)$$

Y se puede expresar en la siguiente ecuación (6):

$$\frac{d(C_i * V)}{dt} = V * r_i \quad (6)$$

El primer término de la ecuación (6) indica la variación de la concentración de un componente *i* respecto al tiempo y el segundo término representa la generación del componente *i* debido a la reacción bioquímica del proceso.

Balance de energía

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{acumulación de calor} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Calor que} \\ \text{entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Calor que} \\ \text{sale} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Calor} \\ \text{evolucionado} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Calor} \\ \text{transferido} \end{array} \right) \quad (7)$$

Y se puede expresar en la siguiente ecuación (8):

$$\frac{dQ}{dt} = (Q_e - Q_s) + \frac{dQ_g}{dt} - Q_{transf} \quad (8)$$

El primer término de la ecuación (8) indica la acumulación de energía en el sistema con respecto al tiempo, el segundo es la diferencia de calor que ingresa con el flujo de alimentación y el calor que brota con el flujo de salida del sistema. El tercer término muestra la generación de energía por reacción bioquímica del proceso y el cuarto es el caudal de calor suministrado a través de la interfase (Abuámer, 2007) y Ribas et al., (2011).

2.7 MATLAB

Fue creado por Cleve Moler en 1984, fundador de MathWorks, la primera versión del software se escribió en FORTAN, siendo la única estructura de paquetes algorítmicos para el álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje (Pazmiño, Jácome, Bolaños, & Santiana, 2018).

MATLAB es una abreviatura de Matrix Laboratory (Laboratorio Matricial), es un entorno de computación avanzado, que facilita la ejecución del cálculo numérico y simbólico, aplicable en la resolución de problemas científicos y de la ingeniería, además se caracteriza por la visualización de datos en diferentes formas (gráficas 2D, 3D, tablas, etc.) (Olivar, 2019).

Según MathWorks (2020), la plataforma MATLAB contiene una amplia biblioteca de cajas de herramientas preconstruidas que permite comenzar con algoritmos esenciales y no partir de cero, además puede ejecutar análisis de datos muy grandes y también se puede integrar con otros idiomas, permitiendo implementar aplicaciones dentro de los sistemas web, empresariales y de producción. Sus características son:

- Lenguaje de alto nivel para computación científica e ingeniería
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces personalizadas.
- Aplicaciones para ajuste de curvas, análisis de señales, etc.
- Gráficos para visualizar valores y herramientas para crear trazados personalizados.
- Cajas de herramientas con múltiples aplicaciones.
- Interfaces para lenguajes C, C ++, Java, Python, SQL y Microsoft Excel.

MATLAB como herramienta de simulación, ayuda a predecir el comportamiento de un sistema a medida que las condiciones evolucionan con el tiempo o cuando se producen los eventos. Puede ser aplicado en diagnóstico de problemas, modelado, optimización y diseño. Para ello, se necesita de un modelo matemático del caso de estudio, que se pueda expresar como un diagrama de bloques, esquemas, diagramas de estados o incluso un código (Pazmiño et al., 2018).

Un script en MATLAB, un tipo de archivo más simple de programa, por lo general son utilizados para automatizar una serie de comandos de MATLAB, como cálculos que se deban realizar continuamente, al ejecutar un script, simplemente se ejecuta el código escrito en el archivo. Un código es una secuencia de pasos que debe seguir un paquete informático para alcanzar un objetivo (resolver un problema) (MathWorks, 2020).

2.7.1 ANÁLISIS DE DATOS

Según MathWork (2020), el procesamiento de información abarca tres fases, empieza con la importación de estos al espacio de trabajo en MATLAB, cuando son muchos valores para trabajar y se crean variables de datos cuando son pocos y estos van a ser modificados constantemente. En esta etapa se determinan los valores atípicos, cuyas diferencias son drásticas respecto a los patrones, se establecen datos uniformes y tendencias para identificar los posibles modelos.

La segunda fase es el modelado, es quien proporciona una descripción entre las variables y parámetros que conducen el modelo, traduciendo la comprensión de las relaciones de datos en herramientas adecuadas para predecir nuevos valores de interés. En MATLAB, las funciones operan en conjuntos completos, por lo tanto, la vectorización de los valores es importante ya que permite la simulación más eficiente de una estructura (MathWork, 2020).

MathWorks (2020), el desarrollo de algoritmos y aplicaciones es encontrar un vector que minimiza una función sujeta a condiciones, mediante la simplificación y conversión del problema a un formato estándar, llegando a un único punto factible que representa la solución. En este punto es importante aplicar los siguientes aspectos:

- Verificar si los límites y restricciones sean coherentes.
- Comprobar si alguna variable tiene límite superior e inferior, de ser el caso, verificar la viabilidad y eliminar o cambiar la variable.
- Verificar si la restricción de igualdad involucra una variable, si es así, eliminar la variable.

- Comprobar si la restricción de desigualdad aplica a una sola variable, si es así, cambiar la misma por un límite.

Y finalmente los resultados, cuyas tablas de datos son grandes y difíciles de interpretar, la visualización mediante esquemas permite tener un mejor panorama del comportamiento y funcionalidad del modelo o aplicación desarrollada. A través de una gráfica es fácil identificar tendencias, elegir valores altos y bajos, además aislar puntos de datos que puedan ser erróneos, también permite verificar visualmente si el modelo produce resultados esperados (Moore, 2007).

El ajuste de curvas y superficies se emplean cuando se necesita conocer datos intermedios no conocidos o en casos que se requiera obtener una versión simplificada de la función, y posteriormente usar la misma para determinar nuevos valores. Por lo general cuando los valores no son muy exactos, la mejor manera de realizar un ajuste es por medio de una sola curva que representa la tendencia central de los datos, a través de la regresión lineal, cuyo procedimiento más utilizado es mediante mínimos cuadrados (Agud & Pla, 2015).

2.7.2 RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En la resolución de problemas de ingeniería y ciencias, es importante tener un enfoque consistente del sistema. Moore (2007), plantea un procedimiento aplicable en la química, física, matemática, termodinámica, diseño de ingeniería, ciencias sociales, económicas y sociología.

- Plantear el problema. En esta primera fase es importante la realización de un esquema que permita comprender de mejor manera el problema, caso contrario será casi imposible resolverlo.
- Establecer las entradas y salidas. Definir los valores conocidos y las incógnitas. Tener cuidado con las unidades ya que generan respuestas incorrectas al no trabajar con las mismas unidades, además se debe identificar las constantes de reacción/consumo que interfieren en el proceso.
- Desarrollo y resolución del algoritmo. Crear un algoritmo que describa y permita dar solución al problema planteado. Aquí es importante identificar todas las ecuaciones necesarias que relacionen los valores de entrada con

las incógnitas y dar una solución mediante Matrix Laboratory. Utilizar gráficas para mejor visualización y análisis de resultados.

- Probar la solución. La última fase consta en responder preguntas como: ¿Los resultados tienen sentido físico?; ¿Coinciden con los cálculos de la muestra?; ¿La respuesta es la que pedía en realidad?

2.8 SIMULINK

MathWorks Simulink Getting Started Guide (2020) afirma que: Es un entorno de diagrama de bloques (figura 11) para la simulación de procesos – multidominio, análisis y modelado de sistemas, lo cual permite un diseño a gran nivel, también la generación automática un código, prueba continua y verificación de modelos construidos. Simulink contiene editor de gráficos, bibliotecas de bloques preconstruidas, personalizadas, solucionadores para modelar sistemas dinámicos. La interfaz de Simulink se integra con MATLAB, esto permite incorporar algoritmos de Matlab en nuevos modelos y exportar los resultados de simulación a Matlab para un análisis de datos más riguroso. Entre sus características más sobresalientes están:

- Editor de gráficos para construir y administrar diagramas de bloques.
- Biblioteca de bloques predefinidos para modelar nuevos sistemas.
- Visualizaciones de datos para ver resultados de simulaciones.
- Herramientas de análisis de modelos en virtud de refinar la arquitectura del modelo y aumentar la velocidad de simulación.
- Herramientas de gestión de proyectos y datos para gestionar archivos y modelos.
- Bloque de función de MATLAB para importar algoritmos MATLAB en modelos.
- Herramienta de código para importar códigos en lenguaje de programación C y C ++ en modelos.

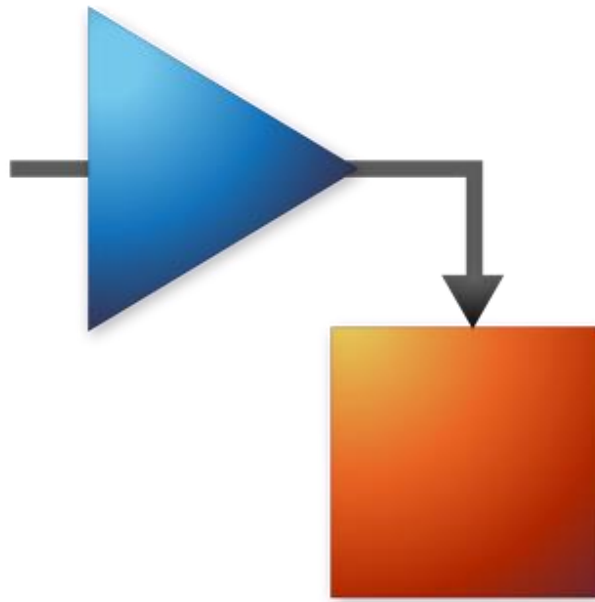


Figura 11. Diagrama de bloques de Simulink (MathWorks)

El modelado es la forma de crear una representación virtual de un sistema del mundo real, la cual está sujeta muchas condiciones iniciales y así se puede observar cómo se comporta el fenómeno en estudio. La simulación de procesos es muy importante para probar condiciones que son difíciles de producir con solo prototipos de hardware. El modelado en Simulink también se puede realizar mediante la generación de código del sistema en la interfaz de MATLAB, lo cual reduce el tiempo y evita la introducción de errores al codificar manualmente (MathWorks, Simulink Getting Started Guide, 2020) (MathWorks, Simulink User's Guide, 2020).

Según MathWorks (2020), los bloques de Simulink representan operaciones matemáticas elementales, cuando se conectan entre sí, el diagrama resultante es el equivalente al modelo matemático o esquema de un sistema construido. Cada sistema está compuesto por elementos funcionales que interactúan entre sí. Conectar bloques es similar a conectar bloques reales, como bombas, válvulas, biorreactores, etc. Los diagramas del software Simscape imitan el diseño de un sistema físico, en este punto, no es necesario especificar la dirección de flujo de proceso y de información. El enfoque de red física son sus variables y conexiones resuelve automáticamente todos los problemas con sus variables. El número de puertos de conexiones para cada elemento está dado por el número de flujos que intercambia con otros elementos del sistema.

2.9 SYSTEM IDENTIFICATION

System identification o en español identificación de sistemas. Es una aplicación para el modelado de sistemas dinámicos, análisis de series y pronósticos. Es capaz de aprender dinámicas entre funciones de transferencia, modelos de proceso, modelos en estado continuo, discreto mientras se utilicen datos en dominio del tiempo o frecuencia (MathWorks, System Identification Toolbox Getting Started Guide, 2022).

La caja de herramientas permite estimar la dinámica de sistema utilizando técnicas de aprendizaje automático como procesos Gaussianos, etc. Utiliza aprendizaje profundo para capturar la dinámica de los datos que representan el objeto en estudio.

El proceso de identificación de sistemas requiere:

- Medidas de señales de entradas y salidas de un sistema.
- Selección de una estructura de modelo de interés.
- Aplicar un método de estimación para estimar valores y parámetros que rigen su proceso.
- Evaluar el modelo para determinar si en realidad representa la realidad.

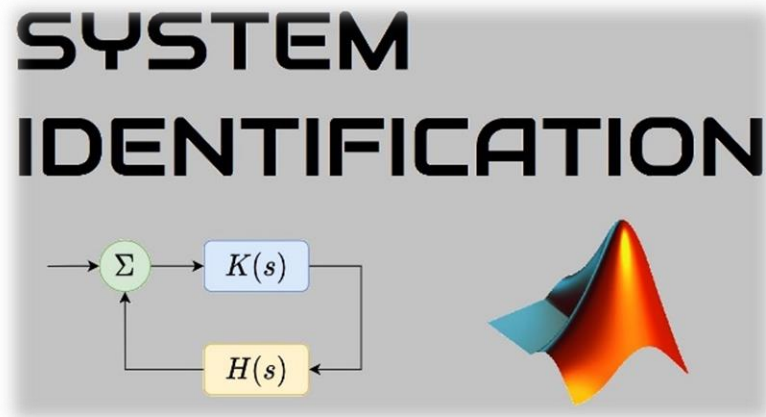


Figura 12. System Identification (MathWorks, 2022)

2.10 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS

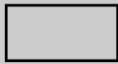

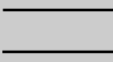

El diagrama de flujo de datos (DFD) o también llamado diagrama de contexto, es un esquema de representación gráfica que comprende un orden cronológico a

seguir. Fue desarrollado por Larry Constantine, este modelo lógico adopta un punto de vista tipo entrada – proceso – salida de la información, son utilizados para la creación y modelación de nuevos sistemas (Pressman, 2010).

Las ventajas de usar un diagrama de flujo de datos radican en cuatro aspectos importantes que son:

- Libertad para utilizar los cuatro símbolos. En la tabla 4 se muestra la nomenclatura característica de los DFD.
- Permite comprender con más detalle la capacidad de interrelación entre sistemas y subsistemas.
- Se puede comunicar el conocimiento actual por medio de DFD.
- Analizar un sistema propuesto para determinar si se han definido datos y procesos necesarios (Kendall & Kendall, 2011).

Tabla 4. Nomenclatura para la construcción de DFD

Simbología	Detalle	Descripción
	Entidad externa	Es quien recibe o envía datos, comunicándose con el sistema
	Proceso	Obtención de un resultado
	Almacén	Almacenamiento de datos o resultados
	Flujo o conector	Indica la secuencia

Fuente. (Kendall & Kendall, 2011)

Para el desarrollo de un diagrama de flujo de datos, se aplica cuatro reglas básicas que son:

- El diagrama de flujo de datos debe tener por lo menos un proceso y no debe existir objetos independientes o conectados entre sí.

- Un proceso debe recibir mínimo un flujo de datos entrante y al mismo tiempo debe crear otro de salida.
- Un almacén de datos debe estar conectado con un proceso.
- Las entidades externas nunca deben conectarse entre sí, aunque se comunican de forma independiente, pero esa comunicación no forma parte del sistema que construimos mediante el DFD (Kendall & Kendall, 2011).

2.11 PRUEBA t – STUDENT

La prueba t de Student, se utiliza para determinar si las medidas de dos grupos de datos presentan diferencia significativa. Esta prueba se fundamenta en dos principios; el primero, en la distribución de normalidad, y la segunda, que las muestras sean independientes (Turcios, 2015).

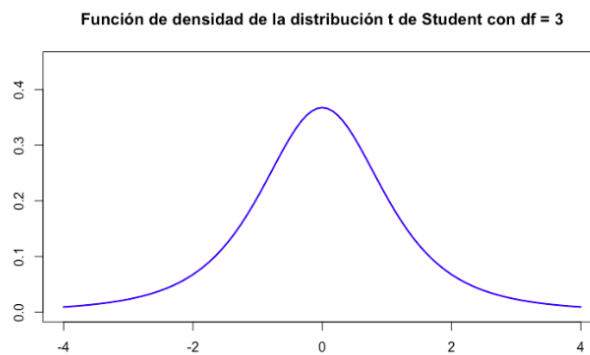


Figura 13. Representación de la distribución de la prueba T Student

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en dos fases: la primera, en la microempresa INDESLAE la cual pertenece a la Asociación Nacional de las Cadenas Productivas del Penco y la Cabuya del Ecuador (ANAGAVEC) y la segunda en el Laboratorio de Bioprocesos Agroindustriales de la Universidad Técnica del Norte. En las tablas 5 y 6 se detallan las ubicaciones de las áreas de estudio.

Tabla 5. Localización de la fase experimental

Ubicación	
Provincia	Pichincha
Cantón	Cayambe
Parroquia	Juan Montalvo
Lugar	Microempresa INDESLAE
Altitud	2810 msnm
Temperatura promedio	14 °C

Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cayambe, 2019)

Tabla 6. Localización del Laboratorio de Bioprocesos Agroindustriales

Ubicación	
Provincia	Imbabura
Cantón	Ibarra
Parroquia	El Sagrario
Lugar	Laboratorio de Bioprocesos Agroindustriales
Altitud	2250 m.s.n.m
Temperatura promedio	17.7 °C

Fuente: (INAMHI, 2020)

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 MATERIA PRIMA E INSUMOS

- Jugo o savia de agave
- Levadura *saccharomyces* Saf Spirit M-1

3.2.2 SOFTWARE

- MATrix LABoratory (MATLAB)
 - System Identification
 - Simulink

3.2.3 MATERIAL DE LABORATORIO

- Tubos de centrífuga
- Gradilla
- Agua destilada

3.2.4 EQUIPOS

- Fermentador de acero inoxidable (200 L)
- Refractómetro digital HANNA 9210
- Alcoholímetro
- Termómetro digital
- Centrífuga
- Potenciómetro

3.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados se tomó datos de: sólidos solubles, potencial de hidrógeno (pH), temperatura y biomasa del proceso semiindustrial de fermentación en la microempresa INDESLAE, que trabaja con savia de agave conocido como " Mishque o chaguarmishque". Para el análisis de datos se utilizó System Identification y Simulink del sistema de cómputo número MATLAB.

3.3.1 Descripción de las variables a evaluarse

Esquemáticamente para modelar un sistema se representa con entrada, proceso y salida, nuestro proceso de fermentación para la producción de etanol queda definido como lo muestra la figura 14.

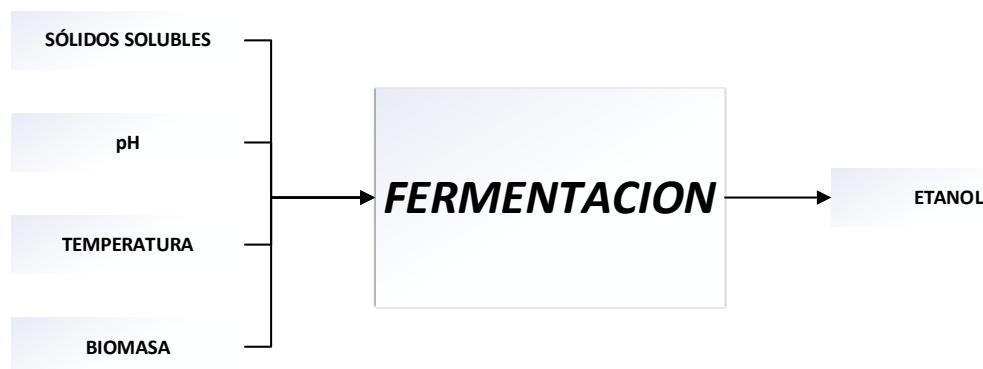


Figura 14. Definición del sistema

En la tabla 7 se detallan las variables evaluadas en la presente investigación.

Tabla 7. Variables experimentales

Variable	Método	Unidad / Rango	Referencia
Cantidad de sólidos Solubles	Refractómetro	°Brix	NMX-F-436-SCFI-2011
pH	Potenciómetro	1 a 14	(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002)
Temperatura	Termómetro	°C	(TROTEC, 2018)
Cantidad de Biomasa	Peso húmedo	g * L ⁻¹	(Reynoso, Magnoli, Barros, & Demo, 2015)
Etanol	Ponderado	%	

Fuente: Autor

Características de la fase experimental

La microempresa Indeslae se dedica a la elaboración de bebidas alcohólicas derivadas del jugo de agave. El sustrato antes de la fermentación pasa por un tratamiento de pasteurización de 60 a 65 °C por 15 minutos, luego se agregan levaduras para el proceso de conversión de azúcares a etanol, lo cual dura alrededor de 18 a 19 horas. Para la cuantificación de las variables se evaluó muestras en intervalos de 30 minutos, cada lote de producción fue de 115 litros.

Cantidad de sólidos solubles

La determinación de sólidos solubles se basó en el índice de refracción a través de un refractómetro según la Norma Mexicana NMX-F-436-SCFI-2011. Con agua destilada se ajusta a cero el equipo, se coloca una muestra en el prisma y se observa en la escala de este, este valor es la cantidad de azúcares existentes en el mosto fermentado.

Rango de pH

Se determinó mediante método de ensayo potenciométrico a través de un potenciómetro (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002). Se ajustó el equipo con las respectivas soluciones de calibración buffer 4 y 7. Se sumergió el electrodo en la muestra analizar. Se esperó unos segundos hasta que se estabilizó el valor, y esta cuantificación es la medida del potencial de hidrogeno.

Temperatura

La medición de la temperatura se realizó por el método del termómetro digital (TROTEC, 2018). En este procedimiento se introdujo la barrilla del equipo en el mosto que está fermentado, se esperó hasta que se estabilice la medida y se procedió tomar la lectura. Este valor nos indica al cual se está realizando la fermentación.

Cantidad de biomasa

Para la cuantificación de biomasa se utilizó un método por gravimetría (Peso húmedo). Este procedimiento puede aplicable en lavaduras, bacterias y hongos filamentosos, se consigue a partir de una muestra en suspensión que es separada por diferencia de densidad, posterior es pesada luego de la separación mediante filtración o centrifugación (Reynoso et al., 2015). Se pesó el tubo vacío de 13 ml, se agregó sustrato fermentado; posterior de centrifugó durante 20 minutos a 4430 fuerzas G, se elimina el sobrante y se pesa el sedimento celular.

3.3.1 ESTABLECER UN MODELO DE BASE FENOMENOLÓGICA PARA LA SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE

Para dar cumplimiento a este objetivo se sigue la metodología propuesta por Gómez et al. (2008) y Alvares et al. (2009) con ciertas modificaciones para el presente trabajo:


- Elaborar un esquema y una descripción del proceso. El texto debe detallar lo que ocurre en el proceso y sus características más sobresalientes e importantes, dependiendo del objetivo del modelo.

- Fijar un nivel de detalle para el modelo, en esta fase se tienen dos componentes principales: primero, las características del proceso y segundo, el resultado que se espera del modelo matemático. En este punto escribir los supuestos del modelo para detallar los fenómenos más sobresalientes.
- Definir el sistema de proceso (SdeP) como lo exija el nivel de detalle. En este punto delimitar las fronteras del sistema e identificar el tipo de interacciones que se dan en las mismas.
- Definir y establecer ecuaciones de balances para las variables, parámetros y constantes conocidas del sistema. Establecer las variables de entradas y cuales debe calcular. En este punto se obtiene las ecuaciones a través del paquete de cálculo System Identification.

3.3.2 ANALIZAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN POR LOTES A TRAVÉS DE MATRIX LABORATORY (MATLAB)



Para cumplir con el segundo objetivo, las variables independientes y dependientes fueron evaluadas en dos paquetes de cálculo, el primero es System Identification a través del cual se extraen los modelos que rigen el proceso de fermentación del jugo de agave y el segundo es Simulink, en el cual se resuelven las funciones de transferencia, visualizando su comportamiento, siguiendo los pasos descritos por MathWorks.

System Identification

- En el ambiente de Matlab, se busca la ventana de aplicaciones, luego ir a la parte de Control System Desing and Analysis, y elegir la app System Identification  o en el command window escribir las mismas palabras.
- Seleccionar importar datos, elegir **Datos de dominio del tiempo**.
- En el cuadro que se despliega, especifique los datos que son **entradas, salidas, hora de inicio y lapsos de tiempos de muestra**.
- Seleccionar **importar** para agregar los datos a la aplicación de modelado

- Luego elegir **estimación**, seleccionar el tipo de modelos, en este caso se elige las funciones de transferencia y colocar la cantidad de polos y ceros que va a tener la ecuación.
- Finalmente estimar las ecuaciones
- En el cuadro de resumen que aparece verificar el porcentaje de FIT que nos arroja el modelo.

Simulink

- En la barra de herramientas de MATLAB, seleccionar **Simulink** 
- Hacer click en **blank model**
- Abrir Simulink Library Browser, el cual proporciona un conjunto de bibliotecas para trabajar en la programación.
- Se utiliza un **step**, para ingresar valores; el bloque **transfer Fcn**, es para agregar los coeficientes de las funciones de transferencia obtenidos en el punto anterior; el **sum**, es utilizado para sumar los resultados de cada ecuación y posterior se utiliza un bloque **gain**, para obtener un promedio de los valores de las funciones de transferencia, este dato es una respuesta de interés en la simulación.
- Ensamblar la red física, una vez que se agregan todos los bloques que representan el sistema, se procede a conectar la red, para ello se utilizan líneas que conectan los bloques, esto representa las conexiones físicas que existen entre los componentes del sistema real.
- Se ajustan los parámetros de cada bloque en base a nuestros datos para tener mejores resultados en la simulación.
- Ejecutar el modelo , al correr el programa el solucionador evalúa el modelo, calcula las condiciones establecidas para el sistema y desarrolla la simulación del proceso.
- Finalmente visualizar y analizar los resultados de la simulación mediante gráficas.

3.3.3 COMPARAR LA CANTIDAD DE PRODUCTO GENERADO EN LA SIMULACIÓN CON LOS TRABAJOS HECHOS EN CAMPO

De acuerdo Ruiz (2019), se puede realizar mediante una relación numérica: menor, mayor e igual, estas tres palabras nos permiten formar comparaciones entre dos o más números, estableciendo diferencias y ordenándolos de acuerdo con nuestra conveniencia, esto es aplicable a cualquier número que tenga la misma unidad de medida. De esta manera podemos realizar una comparación entre el porcentaje de alcohol etílico medido durante las fermentaciones en la microempresa Indeslae vs lo simulado mediante Simulink.

3.4 MANEJO ESPECÍFICO DEL EXPERIMENTO

3.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS

En la figura 51 se presenta el diagrama de bloques de elaboración de etanol de la microempresa Indeslae, dentro del cual se evaluó la fermentación y posterior simulación del mismo proceso.

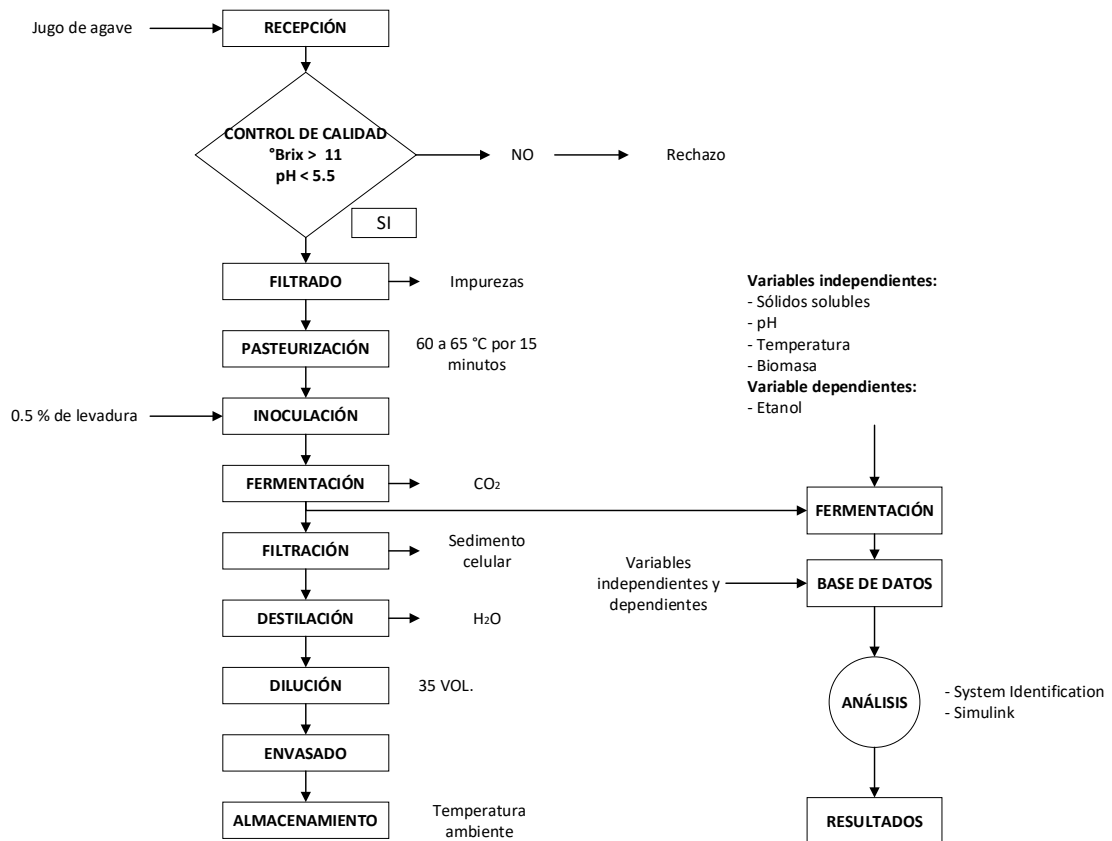


Figura 15. Diagrama de proceso

3.5 DESCRIPCIÓN DIAGRAMA DE PROCESO

3.5.1 Recepción de materia prima.

El jugo de agave utilizado para el desarrollo de la presente investigación fue recolectado en la Comunidad de Cubinche, La Esperanza, Pedro Moncayo, la cual se recibió en bidones de aluminio esterilizados para garantizar la inocuidad del producto.

3.5.2 Control de calidad

El jugo de agave para que entre a proceso de fermentación debe estar en un pH <5.5 y una concentración de sólidos solubles, °Brix > 11 (figura 16).



Figura 16. Control de calidad de la materia prima

3.5.3 Filtrado

Se realiza un proceso de filtrado con una tela para retener las impurezas físicas que pueden estar en la materia prima y posterior pueden afectar el proceso de fermentación ocasionando otros aromas y sabores no propios de agave.

3.5.4 Pasteurización

Se realizó una pasteurización lenta, la cual consiste en calentar la materia prima en un rango de temperatura entre 60 a 65 °C por 15 minutos.

3.5.5 Inoculación

Este proceso consistió en coger 0.7 % del volumen total de fermentación y colocar el 0.5 % de levadura, posteriormente se agita hasta disolver por completo, se deja en reposo de 15 a 20 minutos hasta que se multipliquen los microorganismos (figura 17).



Figura 17. Inoculo

3.5.6 Fermentación

La savia de agave una vez pasteurizado se baja la temperatura de 33 a 34 °C, para el traspaso al fermentador y se agrega el inóculo (figura 18). Las cuatro primeras horas, cada 30 minutos se realiza una agitación para homogenizar el inóculo con el caldo fermentativo.



Figura 18. Etapa de fermentación

3.5.7 Filtración

Finalizado el proceso de fermentación, °Brix y pH constantes, se procedió a trasvasar el mosto fermentado a destilador a través de una tela con el objetivo de retener el sedimento celular que se genera en la etapa anterior.

3.5.8 Destilación

Se extrae el etanol del mosto mediante evaporación en el destilador de acero inoxidable que posee una columna de destilación la cual está compuesta mediante platos en su interior. La temperatura de trabajo es de aproximadamente 78 °C.

3.5.9 Dilución, envasado y almacenamiento.

En la destilación el etanol que se obtiene posee una concentración aproximadamente de 85 a 90 °GL, posterior se realiza una disolución a 35 y 40 °GL para su respectivo envasado en botellas de vidrio y almacenamiento a temperatura ambiente.

Análisis de datos

3.5.10 Base de datos

La base de datos está compuesta de la siguiente manera: como variables independientes (sólidos solubles, temperatura, pH y concentración de biomasa) y variable dependiente (etanol).

3.5.11 Análisis

Los datos fueron analizados en dos paquetes de cálculo, el primero (System Identification) nos ayudó a extraer las ecuaciones de rigen el sistema de fermentación, mientras que el segundo (Simulink), podemos ver el comportamiento de las ecuaciones y predecir nuevos valores.

3.5.12 Resultados

Como resultado se obtuvo un modelo computacional que simula el proceso de fermentación del jugo de agave para la producción de alcohol.

3.6 PRETRATAMIENTOS DE DATOS

En MATLAB se realiza la prueba de Kolmogorov-Smirnov para conocer si los datos provienen de una distribución normal o no; según Romero (2016), se aplica esta prueba cuando la base de datos es superior a 50 valores, para determinar si se trabaja con promedios o medianas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PRETRATAMIENTO DE DATOS

Se realizó un análisis de varianza y dispersión de datos Anexo 1, determinándose para los sólidos solubles, temperatura y etanol que provienen de una distribución normal al presentar el valor (r) mayor al 0.05, mientras que el pH y la biomasa no presentan una tendencia normal, ya que el valor (r) es menor al 0.05.

4.2 ESTABLECER UN MODELO DE BASE FENOMENOLÓGICA PARA LA SAVIA EXTRAÍDA DE AGAVE

De acuerdo con la metodología descrita en el capítulo anterior, los primeros pasos son descripciones del proceso previo a plantear un modelo y se encuentran en el Anexo 2, la otra parte se describe a continuación.

De acuerdo con Bravo, Cortés, Patiño & Cabrera (2008), mencionan que se puede modelar y simular sistemas a través de datos experimentales, extrayendo las ecuaciones con sus respectivos coeficientes. Para esta investigación las funciones de transferencia fueron obtenidas mediante System Identification, aplicación de MATLAB la cual permite conocer la dinámica del sistema a través de ecuaciones. Obteniéndose los siguientes modelos para las respectivas variables:

Comportamiento del etanol en el tiempo (Figura 19) por variable de interés para los sólidos solubles toma el modelo tf1 con un FIT del 96.91%, con un total de 4 polos y 2 ceros, ecuación 9.

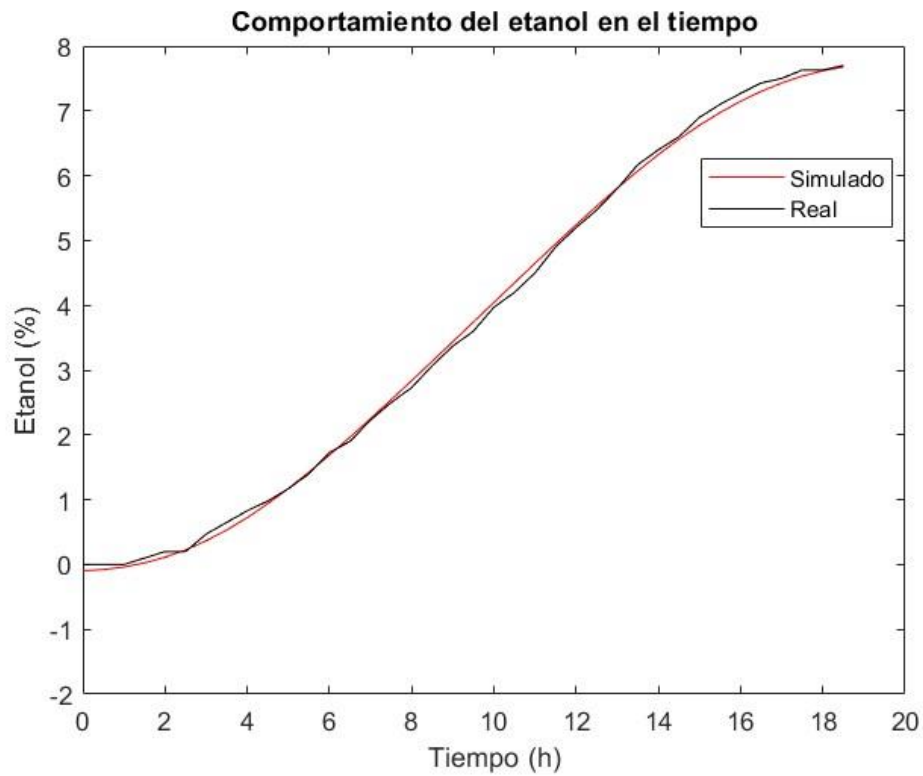


Figura 19. Comportamiento de etanol en el tiempo

$$tf1(s) = \frac{0.008337s^2 - 0.006072s + 0.004543}{s^4 + 0.1788s^3 + 0.6029s^2 + 0.009563s + 0.01034} \quad (9)$$

Tendencia del etanol en el tiempo (figura 23) mediante el análisis de pH con respecto al alcohol es representado por el modelo tf2 con un FIT del 92.16 %, con un total de 4 polos y 2 ceros, ecuación 10.

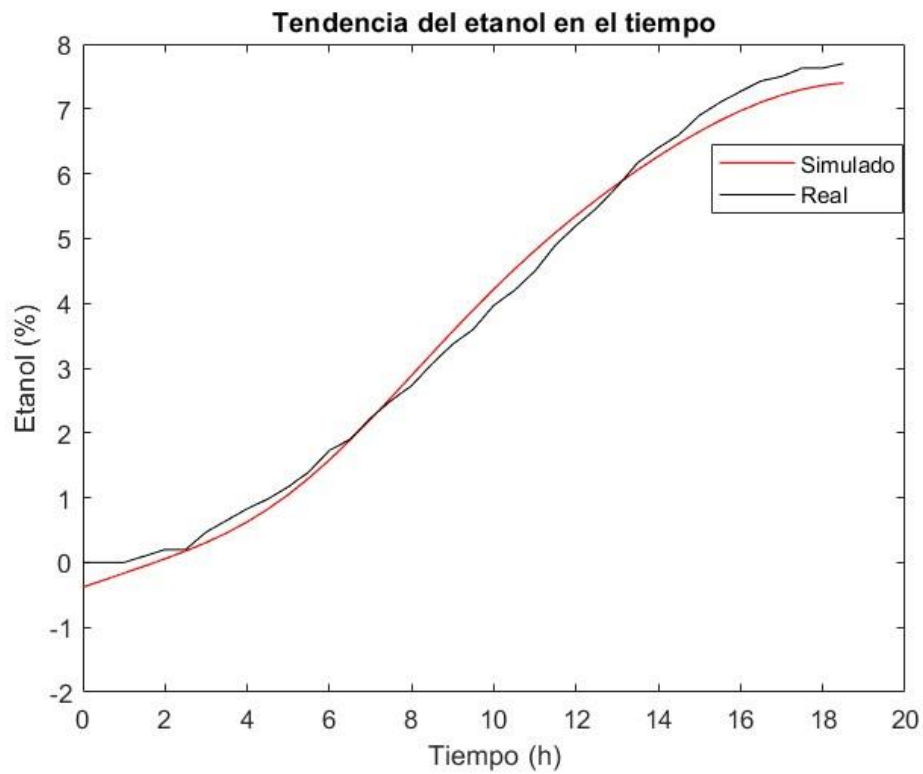


Figura 20. Tendencia del etanol en el tiempo

$$tf2(s) = \frac{0.02174s^2 + 0.005779s + 0.009278}{s^4 + 0.2391s^3 + 0.5221s^2 + 0.01223s + 0.01226} \quad (10)$$

Analizando la temperatura vs etanol tenemos la gráfica 24 de comportamiento del etanol en el tiempo, con el modelo tf3 con un FIT del 94.3 %, con un total de 4 polos y 2 ceros, ecuación 11.

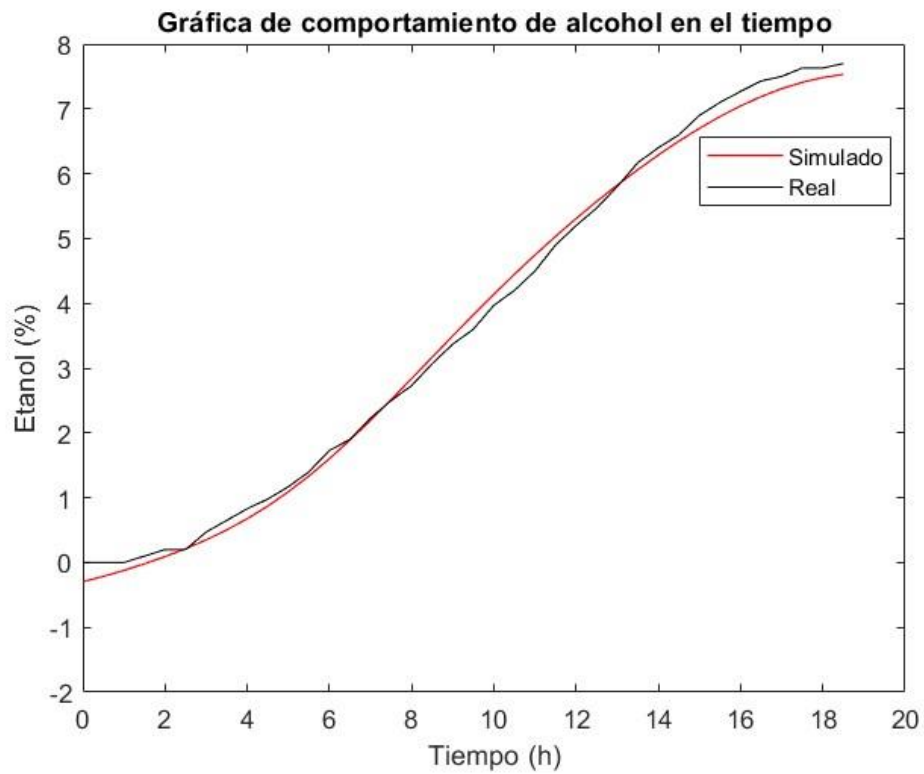


Figura 21. Gráfica de comportamiento de alcohol en el tiempo

$$tf3(s) = \frac{-0.01161s^2 - 0.002512s + 0.001398}{s^4 + 0.2333s^3 + 0.5116s^2 + 0.007265s + 0.01274} \quad (11)$$

El modelo tf4 muestra el comportamiento de etanol en el tiempo, analizando la biomasa respecto al alcohol con un FIT del 93.5 %, con un total de 4 polos y dos cero, ecuación 12.

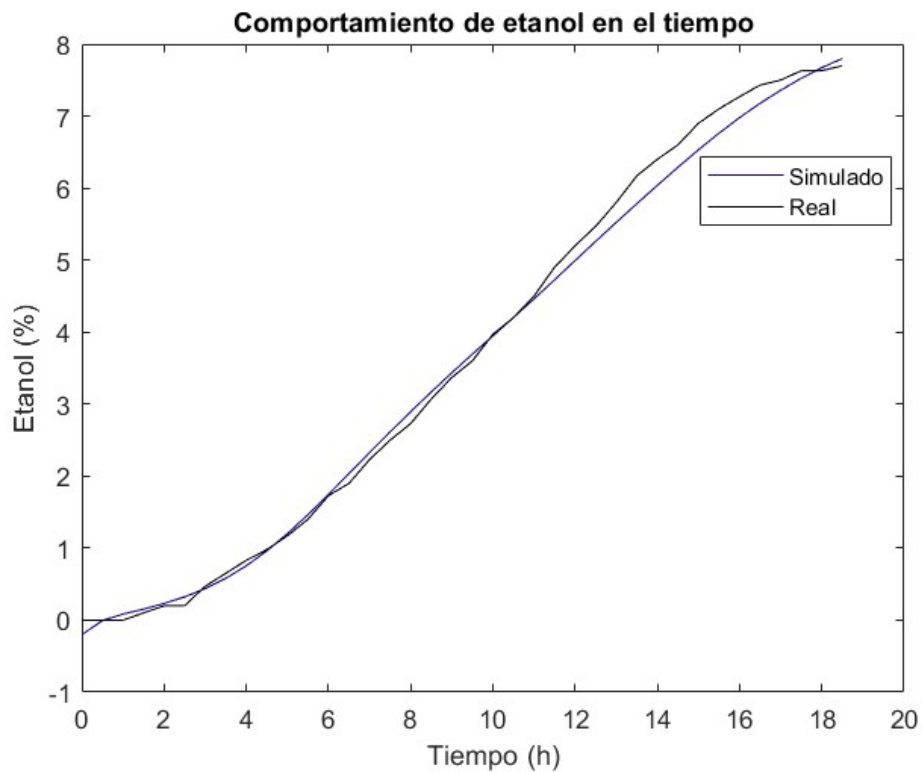


Figura 22. Comportamiento de etanol en el tiempo

$$tf4(s) = \frac{33.47s^2 - 9.926s + 12.29}{s^4 + 0.9725s^3 + 0.8325s^2 + 0.291s + 0.0381} \quad (12)$$

4.3 ANALIZAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN POR LOTES A TRAVÉS DE MATRIX LABORATORY (MATLAB)

Para analizar el comportamiento de los sólidos solubles, pH, temperatura y biomasa en el tiempo se empleó el paquete de cálculo System Identification de MATLAB, obteniendo los siguientes resultados:

En la figura 21 se observa el comportamiento que tienen los sólidos solubles observados experimentalmente (línea negra) y predichos por el modelo (línea roja), ambas segmentaciones presentan la misma tendencia y similitud.

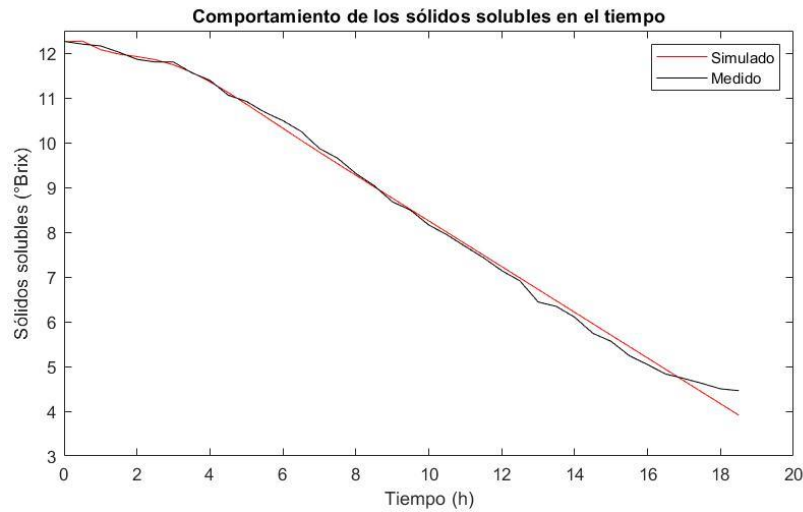


Figura 23. Comportamiento de los sólidos solubles

Empiezan aproximadamente con 12.26 °Brix y termina por debajo de 4.46 °Brix, para la representación matemática de estos datos toma el modelo ft5 y los coeficientes para el mismo corresponden a la ecuación (13), con un total de 3 polos y un cero.

$$tf5(s) = \frac{57.35s - 2.339}{s^3 + 5.311s^2 + 6.596s + 4.58} \quad (13)$$

Con un ajuste a los datos de estimación (FIT) del 94.3 %, según MATLAB (2022), este valor se calcula de manera que 100 significa un ajuste perfecto y 0 un ajuste deficiente, este valor al ser igual o superior al 75 % dentro de las correlaciones de Fisher es válido para un sistema dinámico (Bruno & Borges, 2005.). Los FIT son definidos como el porcentaje de semejanza con la realidad.

Al realizar la anti-transformación de la función de transferencia tenemos una función impulso (14), con la cual podemos realizar una discretización de una señal analógica a digital.

$$f(t) = 4.58 \delta(t) - 1.17 t^2 + 63.946 \frac{d \delta(t)}{dt} + 5.311 \frac{d^2 \delta(t)}{(dt)^2} \quad (14)$$

En la gráfica 24 podemos observar los valores del pH tanto lo medido dentro de un proceso real (línea negra) y lo arrojado por la simulación a partir de los datos experimentales (línea roja).

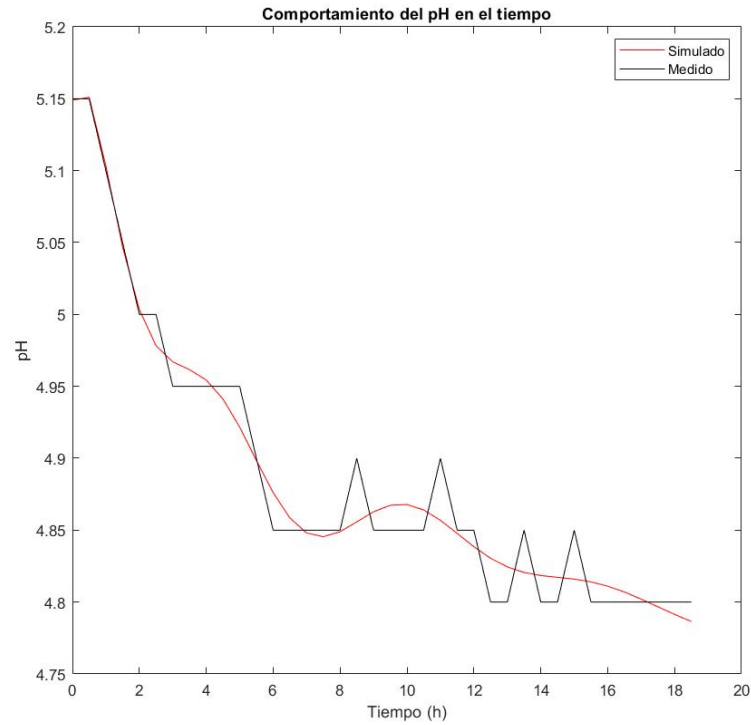


Figura 24. Comportamiento del pH

El modelo tf6 describe este comportamiento, con un FIT del 81.39 %, cuyos coeficientes se muestra en la ecuación (15), con 4 polos y 4 ceros. Existiendo una correlación alta entre las dos tendencias, iniciando el proceso con un pH 5.15 y terminando la fermentación con $\text{pH} < 4.8$ aproximadamente.

$$tf6(s) = \frac{2.648s^4 + 8.538s^3 + 8.538s^2 + 4.375s - 0.007916}{s^4 + 1.742s^3 + 2.61s^2 + 1.913s + 1.009} \quad (15)$$

Anti-transformando la ecuación anterior, tenemos la función impulso (16).

$$f(t) = 1.009 \delta(t) - 0.0013t^2 + 6.288 \frac{d\delta(t)}{dt} + 11.148 \frac{d^2\delta(t)}{(dt)^2} + 10.28 \frac{d^3\delta(t)}{(dt)^3} + 2.648 \frac{d^4\delta(t)}{(dt)^4} \quad (16)$$

Los perfiles de temperaturas observados en una fermentación real (línea negra) y temperatura estimada (línea morada) se observan en la figura 23, para estos datos se toma el modelo tf7, con un FIT del 78.27 % y sus coeficientes se muestran en la ecuación (17), con 4 polos y 2 ceros.

$$tf7(s) = \frac{-67.8s^2 + 21.78s - 0.09373}{s^4 + 1.087s^3 + 5.985s^2 + 0.9592s + 0.6328} \quad (17)$$

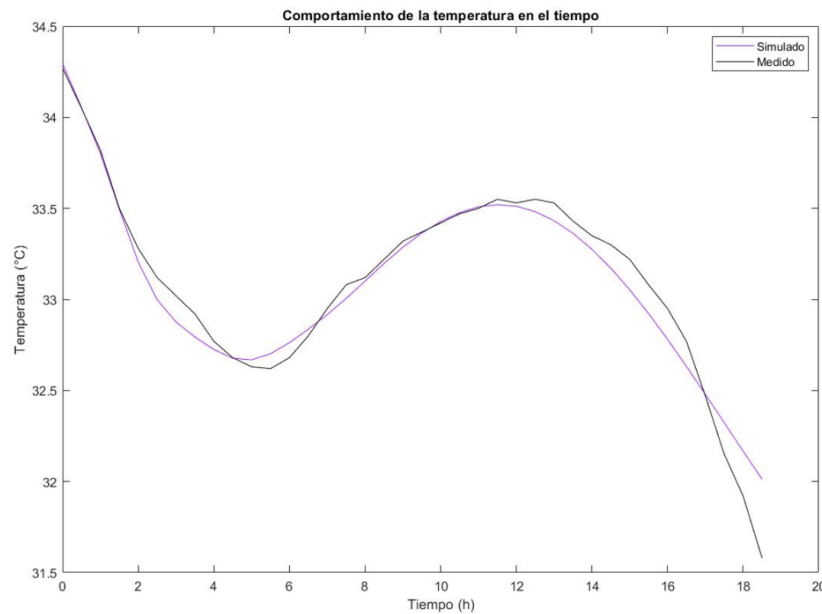


Figura 25. Comportamiento de la temperatura

Realizando la anti-transformación de la ecuación (17), tenemos la función impulso (18).

$$f(t) = 0.6328 \delta(t) - 0.0156 t^3 + 22.74 \frac{d \delta(t)}{dt} - 61.815 \frac{d^2 \delta(t)}{(dt)^2} + 1.087 \frac{d^3 \delta(t)}{(dt)^3} \quad (18)$$

Ambos casos comienzan alrededor de 34.3 °C, después decrece aproximadamente hasta 32 °C, luego crece y se mantiene en 33.5 ± 0.1 °C, empezando a bajar la temperatura aproximadamente desde las 14 horas, tiempo en el cual se han transformado la mayoría de los azúcares a etanol, se puede visualizar el comportamiento muy similar entre los perfiles de temperatura.

La concentración de microorganismos (levaduras) encargadas de la transformación de azúcares a etanol se muestra en la figura 24, pudiendo observar que los datos arrojados por el modelo (línea azul) se ajustan a los valores experimentales (línea negra), con una estimación del 83.71 %, el modelo ft8 describe este comportamiento y sus coeficientes se muestran en la ecuación (19), con 5 polos y 3 ceros.

$$tf8(s) = \frac{-0.002973s^3 + 0.000203s^2 + 0.004298s - 0.0003843}{s^5 + 1.28s^4 + 3.079s^3 + 1.945s^2 + 1.1144s + 3.145e^{-14}} \quad (19)$$

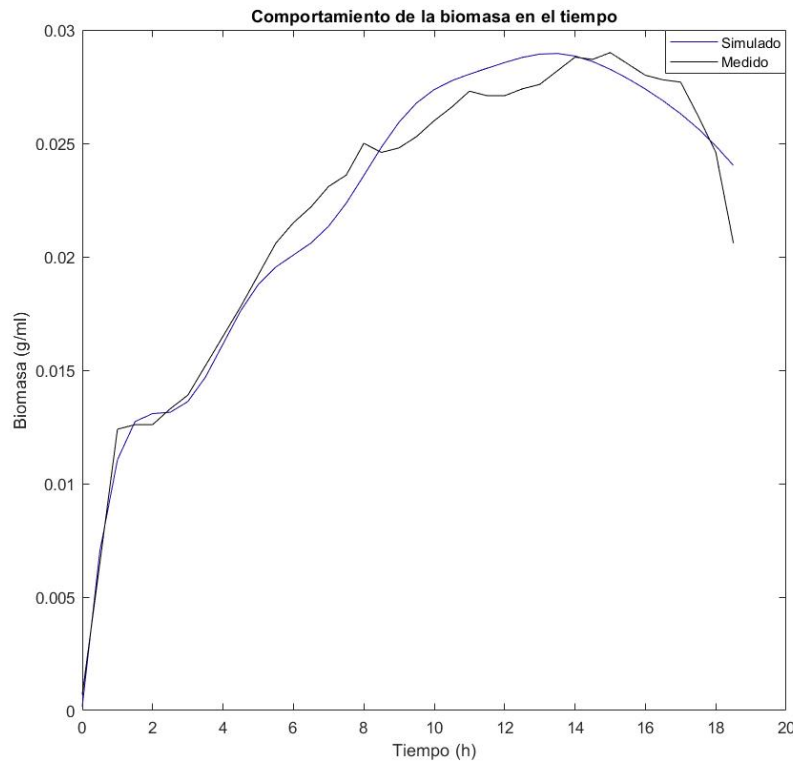


Figura 26. Comportamiento de la biomasa

Anti-transformando la ecuación anterior, tenemos la función impulso (20).

$$f(t) = 3.9807 \cdot 10^{-14} \delta(t) - 1.60125 \cdot 10^{-5} t^4 + 1.119 \frac{d\delta(t)}{dt} + 1.9452 \frac{d^2\delta(t)}{(dt)^2} + 3.076 \frac{d^3\delta(t)}{(dt)^3} + 1.28 \frac{d^4\delta(t)}{(dt)^4} \quad (20)$$

Para describir la fermentación del jugo de agave en la producción de alcohol en términos matemáticos, se analizó las funciones de transferencia descritas en el objetivo anterior, mediante SIMULINK.

Las funciones de transferencia tienen la interacción entre las variables: sólidos solubles, pH, temperatura y biomasa vs la variable etanol, el sistema de fermentación que opera en forma discontinua se escribe mediante una serie de bloques que representan las entradas y salidas del sistema como se muestra en la figura 19, pudiendo así calcular la producción de etanol en el tiempo (figura 25).

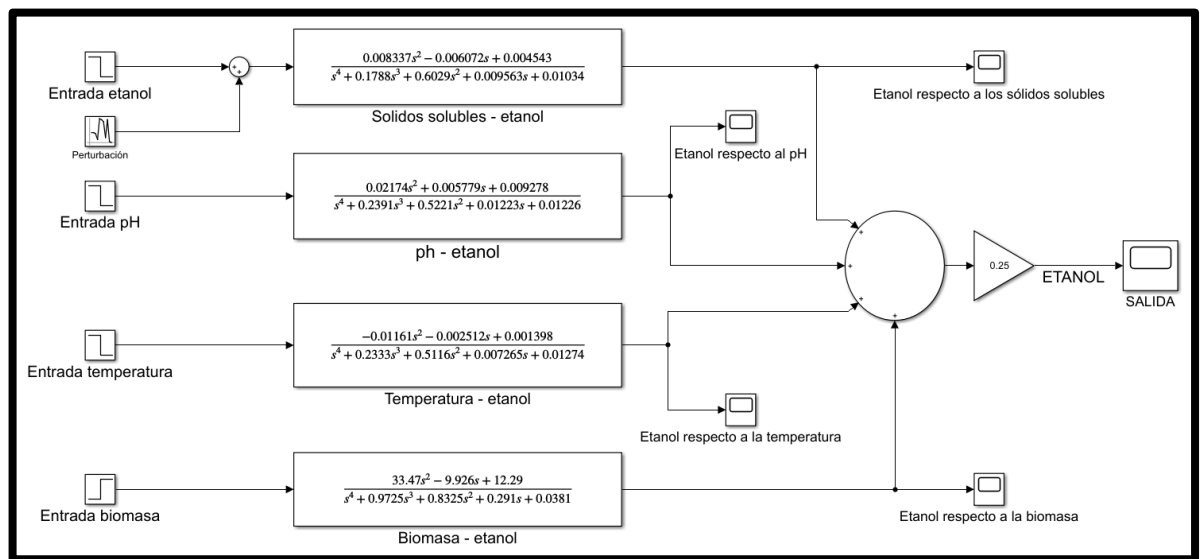


Figura 27. Sistema de fermentación de la savia extraída del agave azul.

La codificación del sistema es interactiva, para ingresar los valores al sistema se lo hacen a través de los bloques **step**, se agregó un bloque llamado **perturbaciones**, el cual permite ingresar valores que pueden afectar el resultado de la simulación. Los modelos se introducen a través del bloque **transfer function**, en el cual se detallan cada uno de los coeficientes de las variables analizar: sólidos solubles, pH, temperatura y biomasa en función de etanol.

Con el bloque **sum** se suman los resultados de cada función de transferencia y es multiplicado por un **gain**. La ganancia en este sistema es en base a la ponderación que se establece para cada ecuación, entonces como tenemos cuatro modelos, se establece un mismo valor para todos.

Para visualizar los resultados es mediante el bloque **scope**, y finalmente, se realizaron los enlaces entre los diferentes diagramas a través de líneas, las cuales representan las conexiones físicas del objeto en estudio.

Parámetros de simulación

- Sólidos solubles: 12.26 °Brix
- pH: 4.15
- Temperatura: 34.27 °C
- Biomasa: 0.0007 g/ml
- Perturbación; Mean: 8.5354 y Variance: 7.2430
- Ganancia: 0.25

Producción de etanol estequiométricamente, ecuación (21) de la fermentación:



Partiendo de la ecuación (21) tenemos la ecuación (22) balanceada:



Tenemos la siguiente relación:

$$1 \text{ mol} \rightarrow 2 \text{ mol de etanol}$$

Consumo azúcar en la fermentación, tenemos la ecuación 22 y su resolución:

$$Brix = X_i - X_f = 12.26 - 4.46 = 7.80 \quad (23)$$

Tenemos las siguientes conversiones:

$$7.80 \text{ Brix} = 7.8 \% \left(\frac{m}{m} \right) = 78 \frac{g}{kg} = 78 \text{ mol}$$

Entonces partiendo de la producción estequiométricamente

$1 \text{ mol} \rightarrow 2 \text{ mol de etanol}$

$$78 \text{ mol} \rightarrow X = 156 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

Producción de etanol real

$$7.70 \% \left(\frac{v}{v} \right) = 77 \frac{\text{ml}}{\text{L}}$$

La producción de alcohol estequiométricamente es de 7.80 % y durante la fermentación es 7.70 %, demostrándose que hay un porcentaje que utiliza la célula para su crecimiento y reproducción, pero según Gómez et al. (2008) y Ribas et al., (2011), para simulaciones este consumo es despreciable asumiendo que todo el azúcar se convierte en alcohol.

Resultado de la simulación

En la figura 26, se muestra el resultado de la simulación, en donde se visualiza la productividad de etanol, llegando a una producción del 7.90 % con una diferencia del 0.2 % con respecto a lo generado en campo. El tiempo en el cual incrementa este porcentaje de alcohol es de 3 horas puesto que en tiempo real alcanza los 7.70 % a las 18 horas con temperatura de operación entre 31 a 34 °C, luego de ese tiempo la producción es lenta, mientras que Ribas et al. (2014), con la utilización del Software Fermenta llegó a obtener 9.76 % de etanol en la simulación, esta diferencia puede darse a que se trabajó con temperatura controlada de 25 °C.

El FIT del modelo general es del 94.22 %, entonces podemos decir que nuestro modelo tiene una semejanza de ese porcentaje con la realidad, habiendo una holgura del 5.78 %, el cual hace que el programa pueda generar más alcohol matemáticamente del que se puede producir bajo estequiometría.

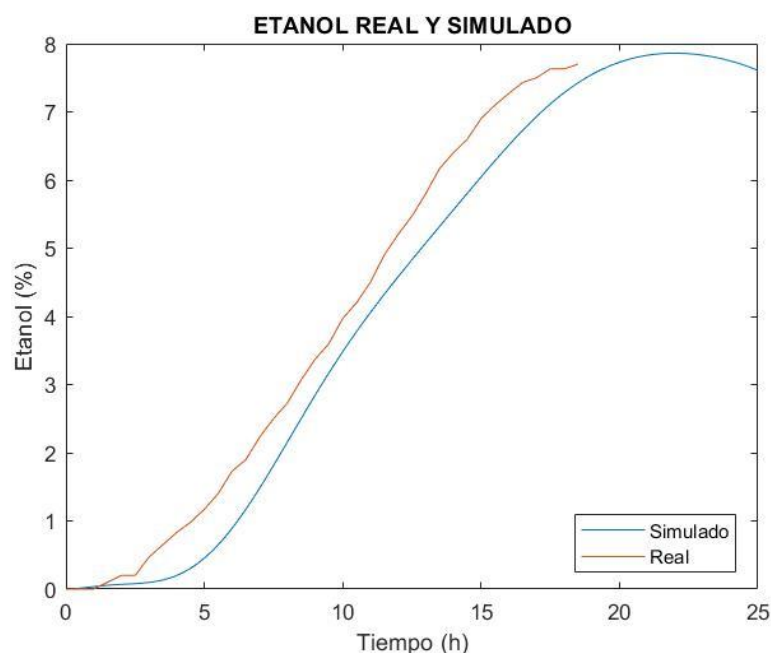


Figura 28. Comportamiento de la producción de alcohol en campo y simulado.

4.4 CANTIDAD DE PRODUCTO GENERADO EN LA SIMULACIÓN CON LOS TRABAJOS HECHOS EN CAMPO

Tala 8. Comparación de rendimiento de la producción de etanol

Simulado / Experimental	Brix inicial (°Brix)	Rango de T (°C)	Grado alcohólico (%)
Simulink	12.26	31 a 34	7.90
(Pérez, Gonzáles, Chávez, & Cortés, 2013)	14	30	8.12
(Vera, García, & López, 2009)	9	-	8.1
(Munive, 2022)	11.5	30	6.33

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8, se observan las condiciones de simulación y trabajos experimentales que trabajaron en condiciones similares, junto al porcentaje de etanol obtenido para cada estudio. Para visualizar de mejor manera la cantidad de producto generado por el programa y los trabajos en campo se realiza un gráfico comparativo (figura 27).

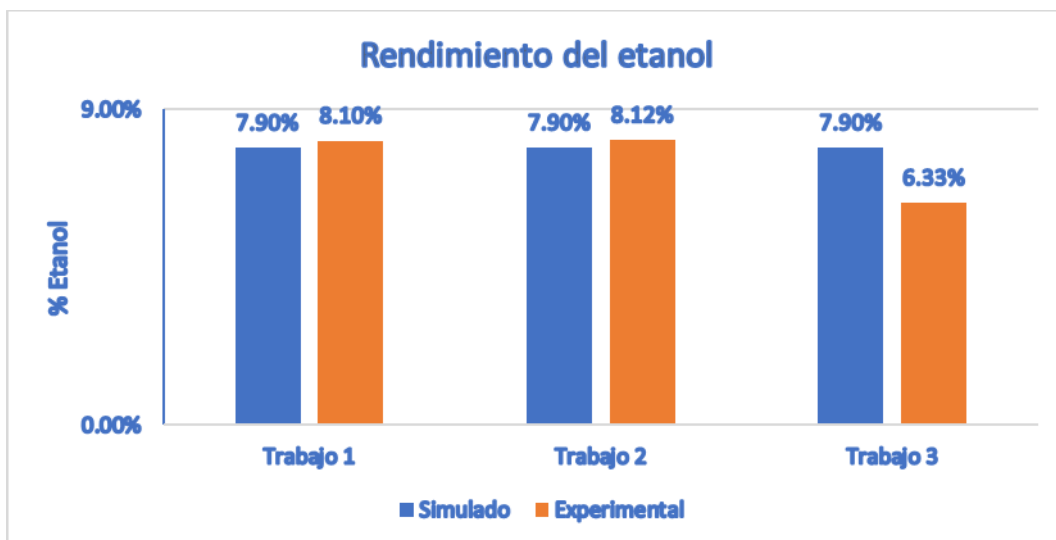


Figura 29. Gráfico de comparación del rendimiento de etanol simulado vs trabajos en campo

Con el gráfico comparativo podemos observar que, las concentraciones son similares para los rendimientos teóricos y experimentales. Es así como en el trabajo 1 desarrollado por Vera et al. (2009), se logra una diferencia del 0.20 % entre el teórico y lo predicho, mientras que en el trabajo 2 de Pérez et al., (2013), se alcanzó una diferencia del 0.22 % y en el trabajo 3 de Munive (2022), del 1.57 %. Este último trabajo se desarrolló con la materia prima del mismo lugar, esta variación puede darse a la cepa utilizada (levadura de panificación), esto es corroborado por Vera et al., (2009), las variaciones pueden deberse al microorganismo utilizado para la conversión de azúcares a etanol, además de la composición fisicoquímica del mosto, pérdida de etanol por evaporación o generación de ácido acético.

Para demostrar estadísticamente que los valores del modelo y trabajos experimentales encontrados en la literatura son o no diferentes, se realizó una prueba estadística t-Student, en la cual se evidenció que los datos predichos por el modelo y obtenidos en campo no presentan diferencias significativas debido a que el p-value es de 0.553

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El modelo que representó en mayor medida la fermentación de savia de agave fue a través de funciones de transferencia, con un porcentaje de ajuste superior al 90 % indicando una alta semejanza entre el modelo y la realidad.
- Se encontró que las variables estudiadas, permiten predecir la producción de alcohol con un error absoluto del 0.2% con respecto al experimental y de 0.1% con respecto a la producción teórica.
- El análisis desarrollado en MATLAB generó con un 95 % de confianza un modelo viable para realizar predicciones en la producción de etanol utilizando savia de agave como sustrato.

5.2 RECOMENDACIONES

- Hacer un modelo de control para optimización del proceso y tener una mayor producción de etanol.
- Realizar estudios con sensores dentro del fermentador para cuantificar el etanol que se evapora.
- Controlar el ambiente de proceso para mejorar el porcentaje del FIT en el modelado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abuámer, Y. (2007). Diseño de una planta piloto para la producción de bioetanol. (Tesis de pregrado) Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Addison, J., Macgarry, K., Wermter, S., & Macintyre, J. (2004). Stepwise linear regression for dimensionality reduction in neural network modelling. *Universidad de Sunderland*, 16-18. Recuperado de: https://www2.informatik.uni-hamburg.de/wtm/ps/dale_AIA.pdf.
- Agud, L., & Pla, L. (2015). *MATLAB para matemáticas en ingenierías*. Obtenido de eLibro: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/57407?page=13> (14/06/2020)
- Alvarez, H., Lamanna, R., Vega, P., & Revollar, S. (2009). Metodología para la obtención de modelos semifísicos de base fenomenológica aplicada a una sulfitadora de jugo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 6 (3), 10 - 20.
- ANAGAVEC. (Febrero de 2020). Agave, cultivo y producción de chaguarmishqui. (A. Bosque, Entrevistador)
- Aros, N., Cifuentes, M., & Mardones, J. (2011). Modelación, simulación y control de procesos de fermentación. *Revista chilena de ingeniería*. 19(2), 210 - 218.
- Asociación Nacional de las Cadenas Productivas del Penco y la Cabuya del Ecuador (ANAGAVEC). (2020). Componentes productivos de la cadena del tzawar para la denominación de origen <<MISKE>>. Quito, Ecuador.
- Barba, J., & Clausell, T. (2014). *Reactores químicos y bioquímicos*. Obtenido de eLibro: <http://dxdoi.org/10.6035/53pientia91>
- Bautista, N., & Arias, G. (2008). Estudio químico bromatológico de aguamiel de agave americana L. (Maguey). *Ciencia e Investigación*. 11(2), 46 - 51.
- Bravo, D., Cortés, J., Patiño, M., & Cabrera, J. (2008). Modelado de Sistemas Dinámicos a Partir de Datos Experimentales. *Revista Colombiana de Física*. 40 (2), 411-413.
- Brito, M. L., Romero, I. A., Guerra, E. F., García, J. L., & Arias, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Scielo*. 14 (2), 129 - 139.

- Bruno, A., & Borges, Á. (2005.). Transformación Z de Fisher para la determinación de intervalos de confianza del coeficiente de correlación de Pearson. *Psicothema. 17 (1)*, 148 - 153.
- Buitrago, N., Martís, V., & Pulido, C. (2016). *Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas, cafés e infusiones*. Obtenido de ProQue Ebook Central: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/reader.action?docID=5486563&query=bebidas%2Bespirtuosas> (21/11/2019)
- Camacho, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Scielo. 50 (2)*, 94 - 96.
- Campos, M. (2017). Métodos de investigación académica. Fundamentos de la investigación bibliográfica. (Tesis de pregrado), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Casas, A., Aguilar, C., Toledo, H. D., Morlett, J., Montet, D., & Rodríguez, R. (2015). Importancia de las levaduras no- *Saccharomyces* durante la fermentación de bebidas alcohólicas. *Redalyc. 23 (65)*, 73 - 79. DOI: 67443217010.
- Castro, A., & Guerrero, J. (2013). El agave y sus productos. *Universidad de las Américas Puebla*, 53 - 61 .
- Ccopa, E., Costa, A., Atala, D., Maugeri, F., Wolf, M., & Maciel, R. (2006). Evaluation of optimization techniques for parameter: Application to ethanol fermentation considering the effect of temperature. *Procces Biochemistry. 41 (7)*, 1682 - 1687.
- Chagua, P., Malpartida, R., & Ruíz, A. (2020). Tiempo de pasteurización y su respuesta en las características químicas y de capacidad antioxidante de aguamiel de Agave americana L. *Revista de Investigaciones Altoandinas. 22 (1)*, 45 - 57.
- Cobo, C. (Julio de 2016). *La Cultura Del Penco (Agave Americano Andino), Un Patrimonio Cultural*. Obtenido de ANAGAVEC: <https://anagavec.wixsite.com/anagavec/la-cultura-del-penco> (08/11/2019)
- Cruz, C. (2010). La enseñanza de la modelación matemática en ingeniería. *Scielo. 25 (3)*, 39 - 46.
- Eynden, V. V., Cueva, E., & Cabrera, O. (1998). *Plantas silvestres comestibles del sur del Ecuador*. Obtenido de https://www.academia.edu/4659362/Plantas_silvestres_comestibles_del_sur_del_Ecuador_-_Wild_edible_plants_of_southern_Ecuador (21/10/2019)

- Flores, A., Mora, R., & Romero, L. (2008). Evaluación fisicoquímica del aguamiel de tres variedades de maguey pulquero (*Agave spp*). *RESPYN*, 8.
- García, A. (2007). Los agaves de México. *Redalyc*. (087), 14 - 23. DOI: 64408704.
- García, E., Méndez, S., & Talavera, D. (2010). *El género agave spp. en México: Principales usos de importancias sociológica y económica*. Obtenido de RESPYN:
http://www.geaac.org/images/stories/DM_GeneroAgaveSSP_130311.pdf
 (24/06/2020)
- García, P. C. (2017). Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. En A. Casas, J. Torres, & F. Parra, *Domesticación en el continente americano. Investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo* (págs. 273 - 309). México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Nacional Agraria la Molina del Perú.
- Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cayambe. (2019). *Cayambe Turismo*. Obtenido de <https://cayambeturismo.gob.ec/?s=JUAN+MONTALVO>
- Gómez, C., Calderón, Y., & Álvarez, H. (2008). Construcción de modelos semifísicos de base fenomenológica. Caso proceso de fermentación. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*. 6(2), 1 - 12.
- Guzmán, R., & Contreras, J. (2018). Aguamiel y su fermentación: Ciencia más allá de la tradición. *Mexican Journal of Biotechnology*. 3(1), 1 - 22.
- Herrera, E., Hernández, G., Moran, A., Flores, M., Cordova, J., Femat, R., & Díaz, D. (2009). Modelado Matemático del Cultivo en Lote y Continuo del Proceso Fermentativo del Tequila. *Asociación de México de Control Automático*, 1 - 5.
- INAMHI. (2020). *Red de Estaciones Meteorológicas*.
- INEN 0338. (1992). *Bebidas alcohólicas. Definiciones*. Obtenido de Servicio Ecuatoriano de Normalización:
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_338-4.pdf
 (13/11/2019)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2002). *Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de pH*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2325.pdf>

- Jurado, S., & Sarzosa, X. (2009). Estudio de la cadena agroindustrial de la cabuya en la producción de miel y licor de cabuya. (Tesis de grado) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Kendall, K., & Kendall, J. (2011). *Análisis y diseño de sistemas*. Obtenido de http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/Id-Analisis%20y%20Diseno%20de%20Sistemas_Kendall-8va.pdf (02/07/2020)
- Koutinas, M., Kiparissides, A., Pistikopoulos, E., & Mantalaris, A. (2012). Bioprocess systems engineering: transferring traditional process engineering principles to industrial biotechnology. *Computational and structural Biotechnology Journal*. 3(4), 1 - 9. DOI: 10.5936/csbj.201210022.
- López, E., Zumalacárregui, L., & Pérez, O. (2019). Análisis de componentes principales aplicado a la fermentación alcohólica. *Scielo*. 6(2), 11- 19. DOI: 2409-8752/2019.006.02.011-019.
- Márquez, D. M., Rodríguez, R., Herrera, R. R., Contreras, J., & Aguilar, C. (2013). Producción Artesanal del Aguamiel: Una Bebida Tradicional Mexicana. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. 5(10), 12 - 19.
- Martín, V., Buitrago, N., & Pulido, C. (2016). *Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas, cafés e infusiones: UF0848*. Obtenido de eLibro: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/59223> (25/06/2020)
- MathWorks. (2017). *Neural Network Toolbox User's Guide*. Obtenido de Academia: https://www.academia.edu/34938587/Neural_Network_Toolbox_Users_Guide
- MathWorks. (2020). *Data Analysis*. Obtenido de MathWorks: https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/data_analysis.pdf (29/06/2020)
- MathWorks. (2020). *Linear Programming Algorithms*. Obtenido de MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/optim/ug/linear-programming-algorithms.html?lang=en> (01/07/2020)
- MathWorks. (2020). *MATLAB Programming Fundamentals*. Obtenido de MathWorks: https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf (8/07/2020)

- MathWorks. (2020). *Primer MATLAB*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/learn_matlab.pdf
 (29/06/2020)
- MathWorks. (2020). *Simscape*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/physmod/simscape/index.html?s_tid=srchtitle
 (10/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simscape Getting Started Guide*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_lang.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simscape Language Guide*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_lang.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simscape Reference*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_ref.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simscape User's Guide*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_ug.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simulink Getting Started Guide*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/simulink_gs.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2020). *Simulink User's Guide*. Obtenido de MathWorks:
https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/simulink_ug.pdf
 (11/08/2020)
- MathWorks. (2022). *Statistics and Machine Learning Toolbox User's Guide*.
 Obtenido de MathWorks:
https://es.mathworks.com/help/pdf_doc/stats/stats.pdf
- MathWorks. (2022). *System Identification Toolbox Getting Started Guide*.
 Obtenido de MathWorks:
https://es.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident_gs.pdf
- Medin, R. (2016). *Alimentos : Introducción, técnica y seguridad (5a. ed.)*. Obtenido
 de ProQuest Ebook Central:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/reader.action?docID=4946136>
 (15/11/2019)

- Moore, H. (2007). *MATLAB para ingenieros*. Obtenido de Elibro: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/74148?page=6>. (14/06/2020)
- Morales, J., Bourges, H., & Camacho, M. (2015). *Tablas de composición de alimentos y productos alimenticios*. Obtenido de https://www.incmnsz.mx/2019/TABLAS_ALIMENTOS.pdf
- Munive, F. (2022). Obtención de una Bebida Fermentada a Partir del Exudado del Agave (*Agave americana* L.). (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Muñoz, J. (10 de febrero de 2010). *Las bebidas alcohólicas en la historia de la humanidad*. Obtenido de <https://www.medigraphic.com/pdfs/aapaunam/pa-2010/pae101i.pdf> (25/06/2020)
- Naranjo, P. (2012). *Mitos, tradiciones y plantas alucinantes*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Nieto, H. (2009). Evaluación de las condiciones de la fermentación alcohólica utilizando *Saccharomyces cerevisiae* y jugo de caña de azúcar como sustrato para obtener etanol. (Tesis de pregrado), Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- NMX-F-436-SCFI-2011. (2011). *Industria azucarera y alcoholera - determinación de grados brix en jugos de especies vegetales productoras de azúcar y materiales azucarados - Método del refractómetro*. Obtenido de <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-436-scfi-2011.pdf>
- Olivar, L. (2019). *Notas de análisis numérico con MATLAB*. Obtenido de eLibro: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/121005>
- Orac, A., & Acosta, L. R. (2016). *El libro. Vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas, cafés e infusiones: UF0847*. Málaga, España: IC Editorial. Recuperado de: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/59220?page=1>.
- Ortega, F., Pérez, O., & López, E. (2016). Modelo Semifísico de Base Fenomenológica del Proceso Continuo de Fermentación Alcohólica. *SciELO*. 27 (1), 21 - 32.
- Pazmiño, A., Jácome, J., Bolaños, P., & Santiana, C. (2018). MATLAB como herramienta de análisis estadístico. *Polo del conocimiento*. 3 (11), 398 - 408. DOI: 10.4067/S0718-07642016000100004.
- Pérez, E., Gonzáles, J., Chávez, M., & Cortés, C. (2013). Caracterización fermentativa de las levaduras productoras de etanol a partir del jugo de

agave cupreata en la elaboración de mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 12 (3), 451 - 461.

Pressman, R. (2010). *Ingeniería del software. Un enfoque práctico*. Obtenido de <http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/ld-Ingenieria.de.software.enfoque.practico.7ed.Pressman.PDF>

Puppo, A. (2008). *Simulación matemática: Aplicaciones en la ingeniería*. Obtenido de <http://www.acadning.org.ar/anales/2008/019-Puppo.pdf> (14/06/2020)

Reynoso, M., Magnoli, C., Barros, G., & Demo, M. (2015). *Manual de microbiología general*. Obtenido de <https://issuu.com/davidandradecontreras/docs/manual-microbiologia-general> (3/9/2022)

Ribas, M., Hurtado, R., Garrido, N., Domenech, F., & Sabadí, R. (2011). Metodología para la modelación matemática de procesos. Caso de estudio, fermentación alcohólica. *Redalyc*. 45 (1), 37 - 47. DOI: 223122251005.

Romero, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a un distribución normal. *Enfermería del trabajo*. 6 (3), 105-114.

Ruiz, D. (2019). Comparación de números naturales. Trujillo , Perú: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12738/RUIZ%20P OLO%20DIANA%20ELIZABETH.pdf?sequence=3>.

Serna, L., Valencia, L., & Campos, R. (2010). Cinética de fermentación y acción antimicrobiana de *Weissella confusa* contra *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus agalactiae*. *Redalyc*. , 55 - 65. DOI: 43019328006.

Suárez, C., Garrido, N., & Guevara, C. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica. *Redalyc*. 50 (1), 20 - 28. DOI: 223148420004.

Tellez, P., Peraza, F., Feria, A., & Andrade, I. (2012). Optimización del proceso de fermentación para la producción de tequila, utilizando la metodología superficie de respuesta (MSR). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 11(1), 1663 - 176.

Torre, L. D. (2017). El penco azul, espinas, corazón y miel. Ecuador.

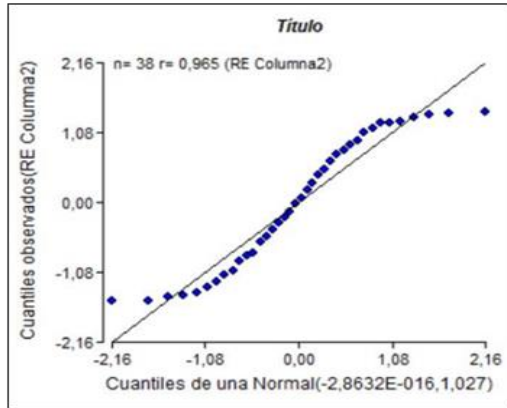
TROTEC. (2018). *Manual de instrucciones. Termómetros de alimentos*. Obtenido de <https://es.trotec.com/fileadmin/downloads/Temperatur/BP5F/TRT-BA-BP5F-TC-006-ES.pdf>

Turcios, R. A. (2015). t-Student. Usos y abusos. *Scielo*. 26 (1), 59 - 61.

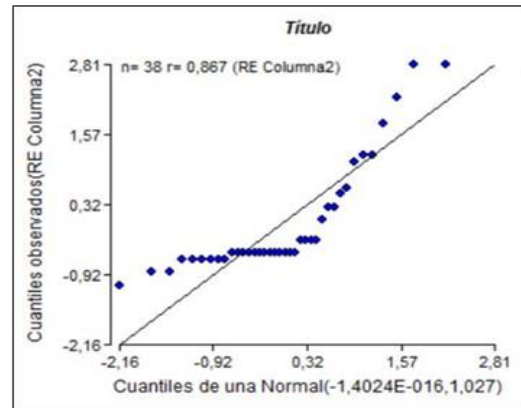
- Valadez, R., Bravo, G., Santos, N., Velasco, S., & Montville, T. (2012). The Artisanal Production of Pulque, a Traditional Beverage of the Mexican Highlands. *Springer*, 140 - 144. DOI: s12602-012-9096-9.
- Vázquez, A., Cházaro, M., & Hernández, G. (2007). *Agaves del occidente de México*. Obtenido de eLibro: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/74312?bfpag=1&bfsearch=&bffolder=40347&prev=bf> (24/06/2020)
- Vázquez, H., & Dacosta, O. (2007). Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. *Scielo*. 8 (4), 249 - 259.
- Vera, A., García, P., & López, M. (2009). Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mexcal de Agave angustifolia y agave potatorum. *Scielo*. 32 (4), 273 - 279.
- Villacrés, P. (2018). Cuantificación de la biomasa residual y caracterización del chaguarmishqui. (Tesis de pregrado), Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador .
- Zamora, F. (2009). Biochemistry of Alcoholic Fermentation. En V. Moreno, & C. Polo, *Wine Chemistry and Biochemistry* (págs. 3 - 26). New York: Springer.

ANEXOS

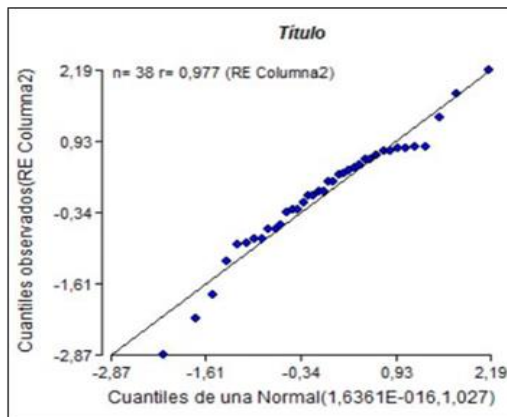
ANEXO 1. Análisis de dispersión de datos A) Sólidos solubles, B) pH, C) Temperatura, D) Biomasa y E) Etanol.



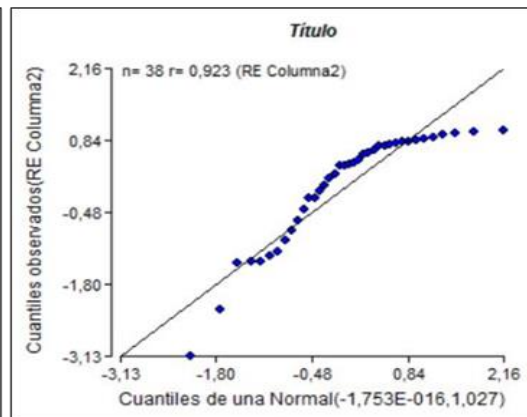
A)



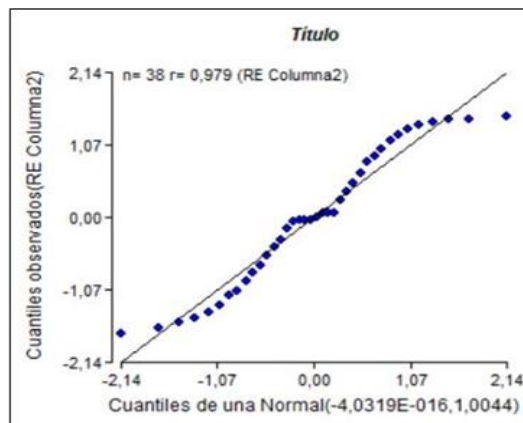
B)



C)



D)



E)

ANEXO 2. Descripción teórica de los pasos para construir un modelo de base fenomenológico

El jugo o savia de agave proviene de la exudación del corazón de la misma planta, este producto para que entre al proceso de fermentación debe tener las siguientes características ($^{\circ}\text{Brix} > 11$ y $\text{pH} < 5.5$), se utilizó como inóculo la levadura *Saccharomyces* Saf Spirit M-1 al 5 % del volumen inicial. El proceso se desarrolla en un ambiente anaerobio dentro de un fermentador de 0.2 m^3 de volumen (**figura 20**), este equipo opera en forma discontinua (lotes o batch), en los experimentos realizados el tiempo que dura la conversión de azúcares es aproximadamente de 15 a 16 horas, llegando a un consumo del 63.65 % de los sólidos solubles y con una producción de alcohol del 7.70 %, con temperatura de operación de 31 a 34 $^{\circ}\text{C}$.

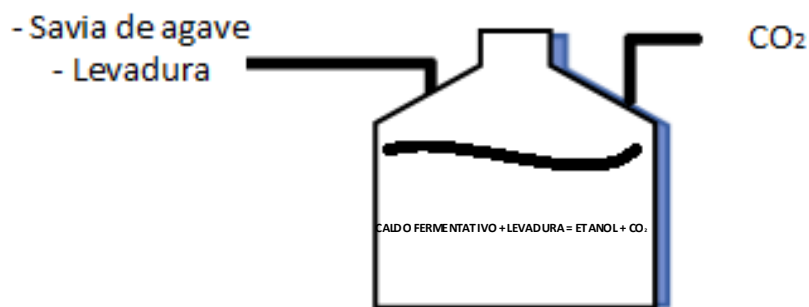


Figura 30. Diagrama del objeto en estudio

Para esta investigación, el modelo matemático tiene como objetivo predecir la concentración de etanol final (variable dependiente), partiendo de las cinéticas de fermentación, siendo variables independientes o entradas al proceso a los sólidos solubles, pH, temperatura y concentración celular (biomasa) variables consideradas más importantes y de interés.

La fermentación alcohólica es la transformación de azúcares a etanol más dióxido de carbono CO₂ (Escalante et al., 2014), este proceso se da con la ayuda de microorganismos que pueden ser levaduras y bacterias (Zamora, 2009). De acuerdo con Gómez et al. (2008) y Ribas et al., (2011), para modelar este proceso, se puede

considerar que el consumo de sustrato para crecimiento celular es mínimo, por lo tanto, existe una producción neta de alcohol; también se analiza como sistema homogéneo, no hay diferencia entre la fase sólida (levaduras) y fase líquida (mosto), asumiendo que todo se encuentra en estado líquido. La fase vapor (gas) dentro del biorreactor no se modela, debido a que la masa del gas es muy pequeña en comparación del caldo fermentativo, por ende, el equilibrio térmico entre las dos fases es al instante Gómez et al. (2008).

ANEXO 3. Determinación de la biomasa por peso húmedo



ANEXO 4. Base de datos

TIEMPO	SOLIDOS_SOLUBLES	pH	TEMPERATURA	BIOMASA	ETANOL
0	12.26	5.15	34.27	0.0007	0.00
0.5	12.20	5.15	34.05	0.0065	0.00
1	12.16	5.10	33.82	0.0124	0.00
1.5	12.02	5.05	33.50	0.0126	0.10
2	11.86	5.00	33.28	0.0126	0.20
2.5	11.80	5.00	33.12	0.0133	0.20
3	11.80	4.95	33.02	0.0139	0.47
3.5	11.56	4.95	32.92	0.0152	0.65
4	11.39	4.95	32.77	0.0165	0.83
4.5	11.06	4.95	32.68	0.0178	0.98
5	10.92	4.95	32.63	0.0192	1.17
5.5	10.68	4.90	32.62	0.0206	1.40
6	10.49	4.85	32.68	0.0215	1.73
6.5	10.25	4.85	32.80	0.0222	1.90
7	9.87	4.85	32.95	0.0231	2.23
7.5	9.65	4.85	33.08	0.0236	2.50
8	9.31	4.85	33.12	0.0250	2.73
8.5	9.04	4.90	33.22	0.0246	3.07
9	8.68	4.85	33.32	0.0248	3.37
9.5	8.49	4.85	33.37	0.0253	3.60
10	8.16	4.85	33.42	0.0260	3.97
10.5	7.94	4.85	33.47	0.0266	4.20
11	7.68	4.90	33.50	0.0273	4.50
11.5	7.43	4.85	33.55	0.0271	4.90
12	7.14	4.85	33.53	0.0271	5.20
12.5	6.91	4.80	33.55	0.0274	5.47
13	6.44	4.80	33.53	0.0276	5.80
13.5	6.34	4.85	33.43	0.0282	6.17
14	6.10	4.80	33.35	0.0288	6.40
14.5	5.74	4.80	33.30	0.0287	6.60
15	5.56	4.85	33.22	0.0290	6.90
15.5	5.24	4.80	33.08	0.0285	7.10
16	5.04	4.80	32.95	0.0280	7.27
16.5	4.83	4.80	32.77	0.0278	7.43
17	4.73	4.80	32.47	0.0277	7.50
17.5	4.62	4.80	32.15	0.0262	7.63
18	4.50	4.80	31.92	0.0246	7.63

18.5	4.46	4.80	31.58	0.0206	7.70
------	------	------	-------	--------	------

ANEXO 5. Prueba t – Student

