

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Química

ANÁLISIS DE LA MOLIENDA DE LA MALTA DE CEBADA Y EFECTOS EN EL RENDIMIENTO DEL MACERADO

Autor: Pablo Martín Pica

Tutor: José Fernando Vidal Barrero

**Dpto. Ingeniería Química y ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Proyecto fin de Carrera
Ingeniero Químico

ANÁLISIS DE LA MOLIENDA DE LA MALTA DE CEBADA Y EFECTOS EN EL RENDIMIENTO DEL MACERADO

Autor:

Pablo Martín Pica

Tutor:

José Fernando Vidal Barrera

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

AGRADECIMIENTOS:

A mi familia, en especial mi padre y mi madre por su paciencia y su apoyo incondicional.

A Fernando Vidal por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

A Gonzalo Romero Millán por su ayuda en mi etapa en el laboratorio durante la realización de la parte experimental.

A Rafael Moriana, Diego Muñoz y Maite Saavedra por su ayuda en el laboratorio.

RESUMEN:

Se va a realizar un estudio experimental de la obtención de mosto a partir de malta de cebada para la fabricación de cerveza. El trabajo se desarrolla en laboratorio y la finalidad es obtener la configuración óptima de una serie de variables que, probablemente, son las más influyentes a la hora de conseguir un mayor rendimiento en el macerado.

El estudio se va a realizar mediante un diseño factorial de experimentos en el cuál las variables escogidas varían entre dos niveles cada una, de forma que obtendremos un diseño factorial de 2^4 correspondiente a las cuatro variables con dos niveles cada una.

Mediante el Algoritmo de Yates veremos el efecto que tienen sobre el rendimiento la variación de alguna de las variables en la configuración del problema para así obtener la configuración óptima.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Cerveza artesanal.....	1
1.2 Molienda.....	7
1.3 Macerado	10
1.4 Diseño de experimentos	19
2. Antecedentes, objetivo y alcance	21
2.1 Antecedentes.....	21
2.2 Objetivo	23
2.3 Alcance.....	24
3. Metodología Experimental	25
4. Resultados	34
4.1 Datos obtenidos en los experimentos	34
4.2 Cálculo de rendimiento de macerado	35
4.2.1 Ensayo 1.....	36
4.2.2 Ensayo 2.....	36
4.2.3 Ensayo 3.....	37
4.2.4 Ensayo 4.....	38
4.2.5 Ensayo 5.....	38
4.2.6 Ensayo 6.....	39
4.2.7 Ensayo 7.....	39
4.2.8 Ensayo 8.....	40

4.2.9 Ensayo 9.....	40
4.2.10 Ensayo 10.....	41
4.2.11 Ensayo 11.....	41
4.2.12 Ensayo 12.....	42
4.2.13 Ensayo 13.....	42
4.2.14 Ensayo 14.....	43
4.2.15 Ensayo 15.....	43
4.2.16 Ensayo 16.....	44
4.3 Algoritmo de yates	46
5. Conclusiones.....	56
6. Anexo I: Minimash.....	60
7. Anexo II: Tablas de conversión °P-°Brix-SG.....	61
8. Bibliografía	62

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Variables y niveles para el diseño de experimentos	20
Tabla 2. Variables y niveles entre los que varían	23
Tabla 3. Análisis granulométrico de la molienda.....	29
Tabla 4. Evolución de la densidad del mosto durante la purga del macerador.	32
Tabla 5. Configuración de los 16 experimentos.....	33
Tabla 6. Resultado detallado de los experimentos.	45
Tabla 7. Algoritmo de Yates, primera parte.	47
Tabla 8. Algoritmo de Yates, segunda parte.....	50
Tabla 9. Algoritmo de Yates, tercera parte.	51
Tabla 10. Algoritmo de Yates, última parte.	52

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Evolución de la actividad enzimática con la Temperatura.....	11
Figura 2. Rangos típicos de enzimas en el macerado, Temperatura frente a pH.	13
Figura 3. Actividad de la β -amilasa (temperatura vs tiempo de maceración)	15
Figura 4. Vaso de precipitado.....	28
Figura 5. Molino de rodillos.	29
Figura 6. Tamiz utilizado.	29
Figura 7. Rociado del mosto.....	31
Figura 8. Dato de extracto potencial de la malta proporcionado por intermalta.	34
Figura 9. Conversión de gravedad específica a grado plato.	44
Figura 10. Esquema del algoritmo de Yates 2^3	50
Figura 11. Representación gráfica algoritmo de Yates.	52

1.INTRODUCCIÓN

El trabajo es en su mayoría experimental, en el que, mediante experimentación en laboratorio, vamos a intentar descubrir la configuración de una serie de variables para conseguir el mayor rendimiento posible en la obtención de mosto utilizado en la fabricación de cerveza artesanal.

1.1 CERVEZA ARTESANAL:

Una cerveza artesanal es el producto de la fermentación de un cereal, elaborada en pequeñas cantidades y, por tanto, se da la máxima atención a cada pequeño detalle, asegurando un producto final de mayor calidad y frescura. Gran parte del proceso se realiza de forma manual.

A diferencia con la cerveza industrial, que admite adición de otros cereales, con lúpulo, la fermentación es más rígida, con filtrado químico, con gas carbónico añadido, que contiene aditivos químicos y pasteurización con la consiguiente pérdida de propiedades, en la cerveza artesanal las materias primas son de más calidad, la fermentación es más lenta, el filtrado es más natural, sin aditivos, el gas es generado naturalmente, se cuidan las propiedades organolépticas y da lugar a una gran gama de variedades de productos terminados así como a la innovación para buscar distintos tipos de cerveza final, da lugar a la innovación.

El arte de la elaboración de la cerveza es tan antiguo como la civilización. A través de los jeroglíficos, los historiadores han rastreado las raíces de la elaboración de la cerveza y los primeros documentos datan de los sumerios. Sumeria se extendía entre los ríos Tigris y Éufrates, incluyendo el sur de Mesopotamia y las antiguas ciudades de Babilonia. Al parecer, los sumerios descubrieron el proceso de fermentación por casualidad. Numerosas tablillas de arcilla hacen mención de una bebida que se obtiene de la fermentación de granos de cereal. Fabricaban panes malteados de cebada que luego dejaban fermentar en agua. Tras unos tres o cuatro días y tras el proceso de fermentación, se convertía en una cocción levemente alcohólica

posteriormente utilizada en ceremonias y ritos religiosos. Tras la caída del imperio sumerio, segundo milenio antes de Cristo, los babilonios se convirtieron en los gobernantes de Mesopotamia, en el año 6000 a.C era un alimento básico en la dieta babilónica, bebida de extracto de cebada, salubre, tonificante y fuente de agua. La “sikaru”, bebida embriagadora, era la bebida nacional y de los dioses. Hoy se sabe que los babilonios tenían 20 tipos de cerveza diferentes.

En China del 8000 al 5000 AC había cervezas de distinta calidad para los distintos rangos sociales, datándose tablas de piedra esculpida con recetas, utilizándose en su elaboración vasijas de cuello estrecho y con hendiduras en la superficie interna. Hay testimonios en el código de Hammurabi en el 1750 AC.

La cerveza de Babilonia se exportó a sitios tan lejanos como Egipto, quienes continuaron con la tradición de la fabricación de la cerveza. Utilizaron una más de pan para hacerla. Los egipcios consideraban a la cerveza como un don divino y estaba bajo la protección de Isis (Diosa de los cereales) y Osiris (patrono de los cerveceros).

Después de Egipto vinieron los griegos y romanos, se extendió por todo el arco mediterráneo, que continuaron elaborándola. Sin embargo, con la llegada del Imperio Romano, el vino se convirtió en la ambrosia del Dios Bacón y la cerveza se elaboraba sólo en las zonas exteriores del Imperio, donde el vino era difícil de obtener. Para los romanos la cerveza era considerada una bebida bávara. Con la dominación romana, la cerveza se extendió hacia el norte y el oeste, así como el cultivo de la cebada. La cerveza quedó relegada en esa zona a una simple bebida popular y su elaboración restringida a la cocina de casas.

La prueba más antigua de la cerveza elaborada en suelo alemán proviene de alrededor del 800 a.C. en el periodo de Hallstatt temprano, donde ánforas encontradas cerca de la actual ciudad de Kulmbach se utilizaban para almacenar cerveza.

Como Tácito, el primero en escribir acerca de los antiguos germanos o teutones, lo expresaba así: “Para beber, los teutones tienen un brebaje

espantoso fermentado de cebada o trigo, una bebida que sólo tiene similitud muy lejos del vino”.

Las primeras civilizaciones encontraron en la cerveza propiedades que alteraban el estado de ánimo de lo sobrenatural, y la intoxicación era considerada divina. Los antiguos germanos consideraban la cerveza no solo como un sacrificio a los dioses, sino que como en Egipto, también elaboraban la cerveza para su propio disfrute.

La caída del imperio romano propició una ola de invasión cultural pagana que el cristianismo se encargó de combatir. Con el tiempo, la producción de cerveza cayó bajo la atenta mirada de la Iglesia Romana. Abadías cristianas, como centro de la agricultura, el conocimiento y la ciencia, perfeccionaron los métodos de elaboración de la cerveza. Inicialmente, la elaboraban para los hermanos y para la visita de los peregrinos, más tarde como un medio de financiar sus comunidades. Sin embargo, no era todavía muy conocido el papel de la levadura utilizada hoy día en la fermentación. La fabricación de la cerveza jugó un papel importante en la vida cotidiana. Era considerada una bebida valiosa para productos alimenticios e incluso a los trabajadores se les pagaba a menudo con jarras de cerveza.

Durante el siglo XI la Iglesia dominaba casi todo el comercio de cerveza en Europa. Sin embargo, no es hasta la aparición del gruit (mezcla de plantas como mirto de brabante, ericáceas, romero silvestre) cuando se comienza a cobrar por la bebida. Estas mezclas aromáticas permitían una mejor conservación de la cerveza y la enriquecía al mismo tiempo con un sabor característico. De esta forma, también se aumentó el consumo de cerveza en los alrededores de los monasterios.

La santa Hildegarda de Bingen (1098-1179) fue la gran pionera de la introducción en el medievo del lúpulo en la elaboración de cervezas. Esta santa investigó el uso del lúpulo y una gran variedad de hierbas sanadoras con valiosas propiedades para preservar los alimentos.

No fue hasta los siglos XIII y XIV cuando se generalizó la elaboración de cerveza con lúpulo. Al principio, se introdujo para moderar el consumo de cerveza debido al amargor que dejaba en ésta. Con el paso del tiempo, sin

embargo, los monjes se dieron cuenta de las propiedades inmejorables del lúpulo para conservar la cerveza durante mucho más tiempo, así como sus propiedades aromáticas que hizo aumentar paulatinamente el consumo.

Mucho antes del hallazgo de la levadura LAGER, los cerveceros alemanes habían empezado a hacer cerveza en almacenamiento en 1402. En alemán la palabra lager significa cama, campamento o almacén: lugares bajos. Esta definición tiene que ver con las técnicas que se usan para producir las lagers. Durante los meses de calor, la cerveza se estropeaba y por esto se guardaban en cuevas en Los Alpes. Así se facilitaba la estabilidad de la cerveza y reforzaba un sabor más limpio por dos razones:

- La baja temperatura de la caverna servía como refrigerador que frenaba la creación de bacterias y hongos.
- El tipo de levadura que usaban los productores se cimentaba abajo durante su conservación, lo que impedía su mezcla con otras levaduras del ambiente.

Tal vez el caso más conocido en la historia de la cerveza fue el establecimiento de normas alemanas para los cerveceros. La primera de estas normas fue la inspiración para la Reinheitsgebot de 1516 – la ley de pureza de la cerveza más famosa. Esta ley indica que sólo cuatro ingredientes pueden ser utilizados en la producción de la cerveza: agua, cebada malteada, trigo malteado y lúpulo. La levadura, aunque no se incluye en esta lista, era aceptable, ya que se daba por sentado que es un ingrediente clave en el proceso de elaboración.

Con la llegada de la revolución industrial, el proceso pasa de ser artesanal a ser industrial. La llegada del tren permite que las fábricas de cerveza puedan distribuir sus productos fuera de la región donde se ubican.

Los estudios de Pasteur se constataron de dos hechos importantes:

1. Las levaduras en ausencia de oxígeno dejan de multiplicarse, pero no mueren. Siguen alimentándose de los azúcares del mosto que transforman posteriormente en alcohol.

2. La cerveza se estropea porque existe contaminación de microorganismos que provienen del exterior del proceso cervecero.

Para solucionar este último apartado, se empezaron a esterilizar las cubas y los utensilios utilizados durante la fermentación, así mismo, se empezaron a utilizar levaduras purificadas de forma que el mosto estéril, tras la cocción y la lupulización, ya no pudiera ser contaminado con bacterias durante la fermentación.

Otra revolución de la cerveza fue la aparición de las cervezas lager, también conocidas como Pilsen, por estar elaborada en la ciudad checa Pilsen. Este tipo de cervezas eran refrescantes y espumosas, por lo que pronto se hicieron muy populares. Fue gracias al científico Emile Hansen en 1883 en los laboratorios Carlsberg (fundada por el empresario danés Jacob Christian Jacobsen) cuando se consigue aislar una cepa de levadura (*Saaharomyces carlbergiensis*). Dichas levaduras actuaban a temperaturas inferiores (entre 7-15°C) a las conocidas hasta entonces para la cerveza Ale (entre 12-15°C) por lo que con las técnicas de frío industrial empezaron a desbancar a las cervezas tradicionales.

A principios del siglo XX se produjo una crisis en el sector cervecero, debido a problemas sociales, huelgas por exigencias de subidas de sueldos... En 1907 había en Bélgica 3387 cervecerías. Había un exceso de producción por lo que se bajaron los precios. Además en EEUU apareció la ley seca de 1920 hasta 1933. Con la I y II Guerra Mundial empeoró aún más la situación. Con lo que en Bélgica sólo quedaban en 1981 cuarenta y ocho fabricantes. A partir de 1980 se empezó a producir una importante recuperación gracias a la cerveza artesanal en Inglaterra y EEUU.

En España, la cerveza tuvo poca aceptación entre la población, a diferencia del vino. La primera fábrica de cerveza de la que se tiene constancia en nuestro país fue, con la llegada del emperador Carlos V, originario de Gante, ciudad que fue testigo de su nacimiento en 1500 en pleno corazón de Flandes. Carlos V tenía un gran gusto por la cerveza y no iba a dejar de tomarla por irse a Castilla. De este modo, Charles contrató a un maestro cervecero de Europa central e instala una pequeña fábrica en un monasterio.

La fábrica se construyó junto a la orilla del río Manzanares y permaneció activa desde 1537 hasta 1558, cuando el Rey abdicó y se retiró al monasterio de Yuste en Cáceres. El hecho de que el consumo de cerveza no terminara de despegar, fue debido a que el vino en España era bueno y barato.

No fue hasta comienzo del siglo XX cuando la cerveza gana la suficiente popularidad para que empezaran a abrir grandes fábricas.

El proceso principal de la fabricación de cerveza es la fermentación del azúcar contenido en el mosto para convertirlo en alcohol y dióxido de carbono. Previamente debemos conseguir el mosto en las condiciones de partida para la fermentación, para ello es necesario convertir los componentes iniciales insolubles de la malta con ayuda de las enzimas en azúcares fermentables mediante molienda y macerado.

1.2 MOLIENDA.

Mediante el proceso de molienda de la malta aumenta la superficie de ataque para las enzimas y mejora la degradación de las sustancias. Aunque tenemos que tener en cuenta que tras la maceración debemos filtrar el lecho formado, para dicho proceso nos interesa que las cáscaras estén lo menos destruidas posible ya que estas ayudarán a que no se compacte en exceso, dejando fluir el mosto con más facilidad, actuarán como material filtrante. Para ello es posible el acondicionamiento de la malta mediante humectación, quedando la cáscara más elástica protegiéndola así antes de la trituración. Lo óptimo sería un endospermo seco que se pueda triturar con facilidad y una cáscara húmeda y elástica.

El proceso para humedecer la malta se realiza con vapor saturado o agua a unos 30-35°C un par de minutos antes de la molienda. La humedad aumenta el contenido de agua en la cáscara en torno a un 2,5% mientras que el contenido del agua en el grano tan sólo se incrementa un 0.5 %.

No sólo obtenemos una cáscara más elástica, sino que aumentaremos el volumen final de cáscara presente en el lecho filtrante de un 10 a un 20% consiguiendo una mayor velocidad de filtrado, aumentará el rendimiento y atenuación límite (grado de fermentación, se alcanzará una reacción al yodo normal en menor tiempo (test de almidón y aumentará el volumen formado por molienda y cáscara.

También resaltar como desventaja el aumento de dificultad de la molienda, mayor desgaste de equipos y resultará más complicado eliminar los restos en el molino tras terminar el proceso.

La trituración de la malta depende de su modificación, una malta bien modificada no ofrece gran resistencia al rodillo durante la molienda porque el contenido de grano es fiable y está flojo. En nuestro caso la malta procedente de intermalta es una malta bien modificada, lo cual nos incrementa la porción de harinas y sémolas finas que estarán cargadas de enzimas y cederán su extracto con mayor facilidad obteniendo un rendimiento mayor.

Por tanto, la molienda nos interesa que sea fina pero no en exceso, ya que cuanto más fina, menor será la porosidad del lecho filtrante complicando el filtrado del mosto tras el macerado pudiendo a llegar al límite en el que el mosto no fluya imposibilitando el filtrado. Podemos evitar esto sí, tras la molienda, se tamiza con un tamiz lo suficientemente fino para que sólo pueda eliminar las harinas.

En la industria se utilizan molinos de dos, cuatro y seis rodillos, siendo el último el más frecuente. Un par de molinos de trituración previa, un par de triturados de cáscara y por último un par de rodillos de molienda. Entre cada par de rodillos se encuentra un juego de tamices con dos luces de malla diferentes que separa el material molido en tres fracciones:

Gruesos: cáscaras con sémola,

Medios: Sémolas,

Finos: Molienda fina y harinas.

La harina se deriva directamente a la tolva ya que no será triturada más, las cáscaras son molidas en el segundo par de rodillos dañándolas lo menos posible mientras que en el tercer par de rodillos se triturará la sémola según lo requerido. En la última fase se realiza la molienda fina en el tercer par de rodillos, se debe evitar la harina tamizándola como rechazo.

Utilizando un solo par de rodillos podemos imitar perfectamente esta configuración de molino de seis pares de rodillos haciendo tres pasos por el molino como haremos en nuestro caso.

Tras terminar el proceso de molienda es interesante evaluarla mediante un proceso de tamizado, se toma una muestra de unos 200 gramos del producto obtenido y se divide en seis fracciones por medio de cinco tamices obteniendo un análisis granulométrico como resultado.

La calidad de la molienda afecta a:

- El proceso de macerado y tiempo de sacarificación.
- Filtración del mosto tras el macerado.
- Rendimiento de la sala de cocción. - Fermentación

- Filtrabilidad de la cerveza.
- Color, sabor y carácter de la cerveza obtenida al final de todo el proceso.

1.3 **MACERADO.**

La maceración es el proceso estrella de esta primera fase de la fabricación de la cerveza ya que de ella sacaremos el mosto. El proceso consiste en mezclar el producto obtenido de la molienda con agua caliente de forma que los componentes de la malta entren en solución y con ayuda de las enzimas se conviertan en extractos fermentables. Las transformaciones producidas durante el proceso tienen una importancia decisiva.

Al mosto sólo pueden pasar las sustancias posibles por lo que habrá parte de la molienda que no pasará al mosto, es por ello necesario que las sustancias insolubles de la molienda sean convertidas en solubles durante la maceración. Las sustancias solubles son, por ejemplo, los azúcares, las dextrinas, las sustancias minerales y determinadas sustancias albuminoideas. Todas las sustancias que entran en solución se denominan extracto.

Por el contrario, son insolubles el almidón, la celulosa, las sustancias albuminoideas de alto peso molecular y otros compuestos.

Se trata de convertir en soluble la mayor cantidad posible de compuestos insolubles, es decir, conseguir el mayor extracto posible. Cuanto más extracto obtengamos del macerado, mayor será el rendimiento de dicho proceso consiguiendo ventajas importantes en procesos posteriores como por ejemplo la fermentación o la sala de cocción.

No obstante, hay sustancias indeseadas que pueden formar parte del extracto. Los taninos forman parte de estas sustancias, por tanto, no sólo la cantidad sino también la calidad del extracto es importante.

La cantidad de extracto que obtengamos va a depender de la actividad de las enzimas y dicha actividad va a depender de la temperatura. Por tanto, tendremos que mantener nuestra mezcla en el rango de temperaturas óptimo para que la enzima que nos interese actúe, consiguiendo con ello la degradación del almidón para la obtención de azúcares y dextrinas solubles que es el propósito de la maceración.

El siguiente gráfico muestra la dependencia de la actividad enzimática con la temperatura:

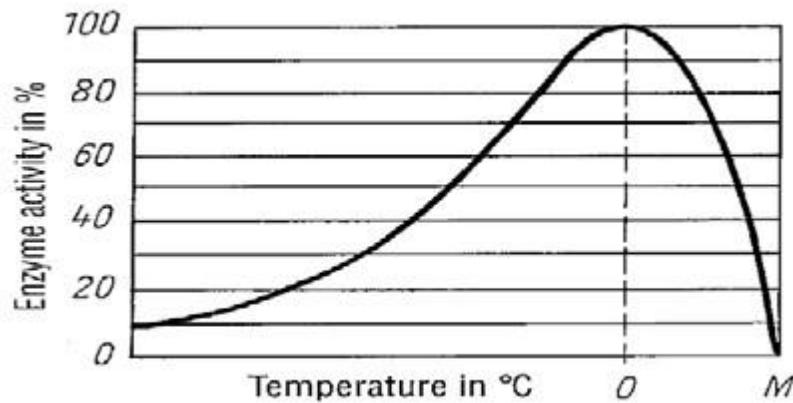


Figura 1. Evolución de la actividad enzimática con la Temperatura.

La actividad de las enzimas aumenta con la temperatura y alcanza un valor óptimo para cada enzima como podemos ver en el gráfico. Hay que tener presente que a partir del valor óptimo la enzima pierde actividad llegando a desactivarse por completo (desnaturalización). La desactivación es tanto mayor cuanto más se haya sobrepasado la temperatura óptima.

La actividad de las enzimas también depende del pH alcanzando un valor óptimo específico para cada enzima. La influencia del pH no es tan relevante en la actividad de las enzimas como lo es la temperatura.

Los procesos de degradación más importantes para la fabricación de la cerveza son:

- La degradación del almidón.
- La degradación del β -glucano.
- La degradación de sustancias albuminoideas.
- La transformación de ácidos grasos.

1. La degradación del almidón:

El componente más importante de la cerveza es el alcohol formado durante la fermentación de azúcares, es por necesario ello que el almidón sea degradado en la mayoría posible a maltosa. Pero el almidón también se degrada a otras sustancias intermedias que no son fermentables como las dextrinas límite. El almidón debe ser degradado completamente a azúcares y

a dextrinas límites no colorantes con yodo. La degradación completa hasta ese estado de reacción normal al yodo es necesaria por motivos económicos y porque los restos de almidón no degradado causan un enturbiamiento de almidón en la cerveza. Según el tipo de cerveza, dicho enturbiamiento puede ser deseado, pero es importante controlarlo por si en nuestro caso no nos interesa.

La degradación sucede en tres etapas: engrudecimiento, licuefacción y sacarificación, que, aunque suceden casi al mismo tiempo, suceden en el orden en el que se han nombrado.

Durante el engrudecimiento los granos de almidón se hinchan y se resquebrajan en solución caliente y acuosa. Las moléculas de almidón liberadas en esta solución viscosa son mucho mejor atacadas por las amilasas que el almidón no engrudado. Según el tipo de cereal se produce el engrudamiento a una temperatura u otra, para el caso de malta y cebada, los almidones engrudan en presencia de amilasas a 60 °C.

La licuefacción es la disminución de viscosidad del almidón engrudado por parte de la α -amilasa. Durante la sacarificación la α -amilasa rompe las cadenas de las amilasas de la amilopectina progresivamente hasta obtener dextrinas de 7 a 12 unidades de glucosa. La β -amilasa disocia dos unidades de maltosa de los grupos terminales de las nuevas cadenas formadas. Con esto la α -amilasa forma asimismo con cada disociación dos cadenas terminales que pueden ser atacadas por la β -amilasa, al disociar maltosa. Debido a la diferente longitud de las cadenas, se forman otros azúcares como la glucosa o la maltotriosa.

En el mosto siempre se encuentran presentes dextrinas límite porque sus enlaces no pueden ser rotos fácilmente. La dextrina límite puede romper estos enlaces, pero con una temperatura óptima de 50-55°C inferior a la temperatura de macerado. A 70°C la dextrina límite tiene una actividad baja. Por tanto,

- la α -amilasa disocia las cadenas largas de almidón a dextrinas más pequeñas. Actúa de forma óptima a temperaturas de 72°C a 75°C y se destruye rápidamente a 80°C. El valor óptimo de pH se encuentra entre 5,6 y 5,8.

- La β -amilasa disocia maltosa de los extremos de cadena no reducidos, pero también forma glucosa y maltotriosa. Actúa de forma óptima a temperaturas de 60-65°C y es muy sensible a temperaturas mayores, desactivándose rápidamente a 70°C. Valor óptimo de pH 5,4 a 5,5.
- La degradación del almidón debe ser monitorizada, dado que el residuo de almidón no degradado y las dextrinas mayores causan un enturbiamiento en la cerveza.

Los rangos típicos de pH y temperatura para las enzimas durante el macerado se representan en el siguiente gráfico:

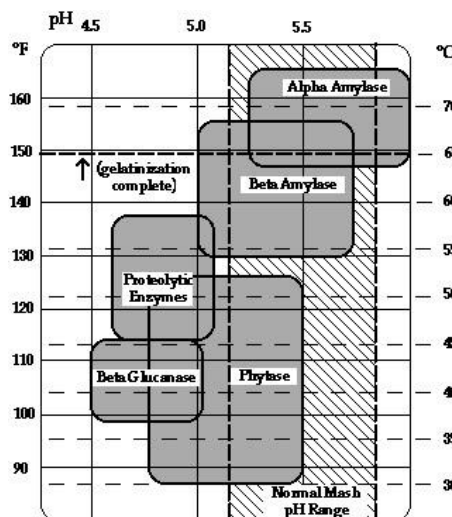


Figura 2. Rangos típicos de enzimas en el macerado, Temperatura frente a pH.

En lo que se refiere a fermentabilidad por la levadura de cerveza, los productos formados durante la maceración por la degradación del almidón son:

- Maltotriosa: Es fermentada por todas las cepas de levadura de fermentación alta.
- Maltosa: Es un disacárido que es fermentable rápido, se trata del principal azúcar de fermentación
- Glucosa: Es la primera en ser utilizada por la levadura, se trata del azúcar de inicio de fermentación.

La porción de azúcares fermentables se determina por la actividad variable de las enzimas. De esta manera se establece al mismo tiempo la atenuación límite durante la maceración.

La composición depende en gran medida del proceso de maceración. Dado que la composición del mosto, en lo referente a los diferentes azúcares y dextrinas influye tanto sobre el desarrollo de la fermentación como sobre la calidad de la cerveza, son importantes para el cervecero los factores que influyen sobre la degradación de almidón durante la maceración. Los factores de influencia son:

- La temperatura durante la maceración: Macerando a temperaturas de 62 a 63°C se obtiene el contenido más alto posible de maltosa y la más alta atenuación límite. Los mostos ricos en maltosa fermentan más rápido y mantiene la levadura durante más tiempo en suspensión. Sin embargo, macerando prolongadamente a temperaturas de 62-64°C se obtienen cervezas con una mayor atenuación límite; pasando por encima de esas temperaturas y macerando prolongadamente con 72-75°C se obtienen cervezas ricas en dextrinas con baja atenuación límite. La influencia de las temperaturas de maceración es extremadamente grande, de manera que durante la maceración se mantienen siempre reposos a las temperaturas óptimas de las amilasas:
- Reposo de formación de maltosa a 62 a 65°C (temperatura óptima de la β -amilasa).
- Reposo de sacarificación a 72-75°C (temperatura óptima de la α -amilasa).

A pesar de que, a temperaturas aún mayores, el proceso de clarificación del mosto se desarrolla de forma notablemente más rápida, como consecuencia de la menor viscosidad del mosto debe tenerse en cuenta que la α -amilasa aún activa se inactiva progresivamente a temperaturas por encima de 78°C. Sin embargo, durante la filtración del mosto puede entrar todavía en solución almidón sin degradar, el cual debe ser degradado. Para esto se necesita de la

α -amilasa aún presente, de lo contrario existe el riesgo de que el mosto que antes era normal a reacción al yodo vuelva a ser no normal.

- Duración de la maceración: Las enzimas ciertamente no actúan de forma uniforme durante el proceso de maceración. Se pueden distinguir en la actividad de las enzimas dos etapas dependientes del tiempo.

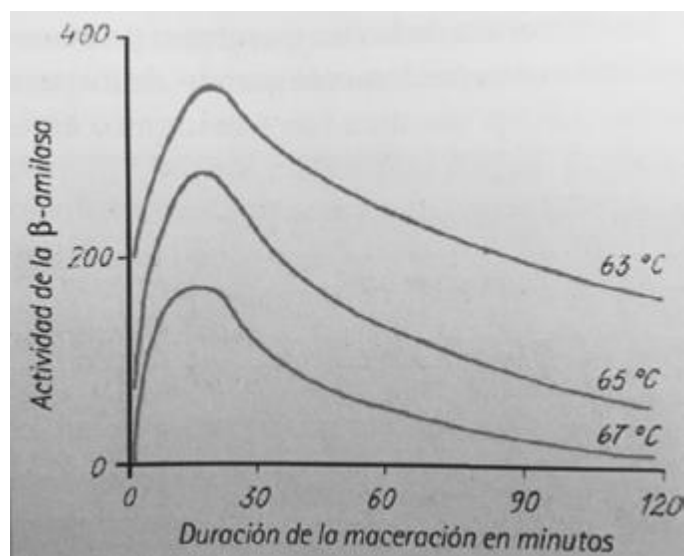


Figura 3. Actividad de la β -amilasa (temperatura vs tiempo de maceración)

En la Figura 3, podemos apreciar que la actividad enzimática alcanza su máximo entre los 15 y los 30 minutos de tiempo de macerado, y es superior a los 63°C que a los 65°C y a los 67°C respectivamente. A partir de los 40-50 minutos la actividad enzimática disminuye considerablemente. Por tanto, la influencia de la temperatura de macerado está condicionada por la duración del proceso.

- pH durante el macerado: Por medio de la maceración en un rango de pH de 5,5 a 5,6, el cual puede ser considerado como rango de pH óptimo para ambas amilasas, se puede incrementar el contenido de extracto, en comparación con el obtenido con un mayor valor de pH de temple. Se forman más azúcares fermentables y aumenta la atenuación límite.

- Concentración de la templa (templa = mezcla entre agua y malta molida): En las templeas más finas entra más extracto en solución, pero las templeas más gruesas protegen a las enzimas de una inactivación térmica demasiado rápida. De esta manera la cantidad de azúcares fermentables aumenta en las templeas más gruesas y con ello la atenuación límite.

Pero esta influencia de la concentración de templa sobre la degradación de almidón es menor que la influencia de los otros factores.

- Control de la degradación de almidón: El control de la degradación de almidón se realiza al final de la maceración, por medio del ensayo del yodo. Dado que la coloración del yodo con almidón y dextrinas mayores sólo ocurre con la templa fría, se debe enfriar la muestra de templa. Sobre una cápsula de porcelana o un bloque de yeso, se pone en contacto la muestra de templa fría con una gota de tintura de yodo 0,02N (solución de yodo y yoduro de potasio en alcohol). No debe aparecer una coloración de la tintura de yodo amarillenta. Si en el mosto continúa produciendo una coloración, entonces su reacción no es normal al yodo.

Con todo esto sacamos como conclusión que para la maceración debemos tener en cuenta una serie de consideraciones clave teniendo muy en cuenta los siguientes parámetros:

- Mantener la temperatura durante todo el tiempo en el rango de temperaturas óptimas de las enzimas evitando en todo momento superar la temperatura máxima de las enzimas.
- Evitar la influencia dañina del oxígeno.
- Utilizar el rango de pH para optimizar las transformaciones y procesos presentes en el tanque de macerado, pH inferior a 5,6.
- Evitar los esfuerzos de corte.
- Acondicionamiento de la malta a alta temperatura.
- Breve tiempo de mezcla.
- Mezcla uniforme, sin grumos.
- Altas temperaturas de mezcla, superiores a 60°C.

Al finalizar el proceso de macerado pasaremos a la filtración del mosto. La templa está compuesta por una mezcla acuosa de sustancias disueltas y no disueltas.

La solución acuosa de los extractos se llama mosto, las partes no disueltas se denominan afrechos (Del lat. *affractum* 'quebrantado'). Los afrechos están compuestos esencialmente por las cáscaras, los embriones y otras sustancias que no entraron en solución durante la maceración, o que han sido precipitadas nuevamente durante la cocción del mosto. Para la fabricación de cerveza se utiliza solamente el mosto, el cual debe ser separado para ese propósito de las heces, en lo posible, totalmente. Este proceso de separación se llama filtración del mosto. En este proceso los afrechos cumplen el papel de material filtrante. El proceso ocurre en dos fases, que se suceden de forma separada, una tras otra:

- (1) La descarga del primer mosto (colada principal) y
- (2) el lavado de los afrechos para la extracción del extracto soluble (coladas secundarias).

Cuando el primer mosto es escurrido a través de los afrechos, queda extracto en estos últimos. Este extracto debe ser recuperado. Por este motivo, los afrechos son lavados para extraer el extracto soluble, luego de haber sido descargado el primer mosto. El lavado para extracción diluye cada vez más el mosto. A los efectos de obtener la concentración de mosto deseada al final de la filtración del mismo, el primer mosto deberá tener, un contenido de extracto de 4 a 6% mayor que el de la cerveza a fabricar. Por ejemplo, en un mosto que tras la cocción deba presentar un 12% de extracto, su primer mosto o colada deberá ser 16 a 20%.

El extracto retenido por los afrechos es extraído por lavado con agua caliente. Este proceso se denomina riego o rociado. Los mostos descargados y más diluidos se llaman coladas secundarias.

Su contenido de extractos disminuye rápidamente y luego de forma cada vez más lenta, dado que el último extracto los afrechos son lavados con dificultad. Se trata aquí sobre todo de un proceso de difusión.

La cantidad de agua de riego depende de la cantidad y de la concentración del primer mosto y de la concentración alcanzable en la paila. Cuanta más agua de rociado pase a través de los afrechos, tanto más intensivamente son lavadas y tanto mayor es el rendimiento.

Pero también: cuanta más agua pasa a través de los afrechos, tanta más agua debe ser evaporada nuevamente durante la cocción. Por esto, debe lograrse un compromiso entre el tiempo de filtración y rendimiento, y duración de cocción y costos de energía.

Con una mayor concentración del primer mosto, se puede rociar tanto más cuanto mayor sea la concentración del primer mosto. Por este motivo, con un primer mosto de porcentaje más elevado se obtiene también un mayor rendimiento. En esto, la temperatura de filtración es de suma importancia. Con temperatura creciente disminuye la viscosidad del líquido. Esto significa que la filtración del mosto sería más rápida a 100°C. Dado que en todos los casos se extrae por lavado, durante el rociado, el almidón no disuelto y remanente en los afrechos, una sacarificación posterior, a través de α -amilasas, sólo puede ser realizada si estas últimas no fueron inactivadas por temperaturas mayores que 78°C. Por este motivo, una filtración a 100°C tiene siempre como resultado un “cocimiento azul”, reacción de yodo. Dado que la α -amilasa es destruida a 80°C, es necesario mantenerse debajo de esa temperatura durante la filtración del mosto.

1.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Se puede definir a los experimentos factoriales como aquellos en los que se comparan o estudian simultáneamente dos o más factores principales a diferentes niveles cada uno. El diseño de dichos experimentos constituye una técnica estadística para analizar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable respuesta. Este estudio permite además evaluar las interacciones entre ellas, se dice que entre dos factores hay interacción si los efectos de un nivel de un factor dependen de los niveles de otro, es decir, la respuesta de un factor es influenciada por los niveles del otro.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Es obvio que, si repetimos un experimento en las mismas condiciones, el resultado presentará cierta variabilidad, pero si dicha experimentación la realizamos en un laboratorio donde la mayoría de las condiciones de operación están controladas, la variación de resultados de los experimentos será menor.

Por tanto, el objetivo de nuestro diseño de experimentos será estudiar de forma experimental si variando las condiciones del proceso se produce algún efecto en la variable respuesta para así evaluar si se produce una mejora en el proceso o por el contrario el resultado obtenido empeora el resultado.

En nuestro caso, centrándonos en la elaboración de la cerveza y, en concreto, en la molienda y el macerado de la malta para la elaboración del mosto previo a la fermentación, tenemos un diseño factorial 2^4 ya que tenemos cuatro variables y dos niveles para cada variable, que son:

- Pasos por el molino (un paso, tres pasos)
- Distancia entre rodillos (0.75mm, 1.5 mm)
- Tipo de molienda (seca, húmeda)
- Tiempo de macerado (60min, 90 min)

Variable	Niveles	
	-1	1
Pasos molino	Un paso	Tres pasos
Apertura rodillos	0.75mm	1.5mm
Tipo de molienda	Seca	Húmeda
Tiempo macerado	60 min	90 min

Tabla 1. Variables y niveles para el diseño de experimentos.

Con dicho diseño, vamos a evaluar mediante la realización de 16 experimentos los efectos que tienen la variación de dichas variables en una variable respuesta que en nuestro caso será el rendimiento del macerado, evaluado mediante el extracto obtenido tras dicho proceso en relación con el extracto potencial de la malta suministrada por intermalta.

Por tanto, después de cada experimento, obtenemos un valor de rendimiento tras la realización de los cálculos pertinentes, el método de resolución del diseño de experimentos para el cálculo de los efectos de cada variable será el algoritmo de Yates que veremos con más detalle en el desarrollo experimental (Capítulo 4).

2.ANTECEDENTES, OBJETIVO Y ALCANCE.

2.1 ANTECEDENTES:

El Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla inició en el curso 2011-12 la implantación de la fabricación de cerveza artesanal como una práctica incluida dentro del programa de la asignatura “Experimentación en Planta Piloto” cuya docencia era impartida conjuntamente en 5º curso de Ingeniería Química (Plan 98) e Ingeniería Industrial (Plan 98). Durante los siguientes cursos, la práctica de elaboración de cerveza fue desarrollándose mejorándose los recursos disponibles mediante la adquisición de equipos y mejora de las instalaciones existentes.

En el curso 2011-12 se realizó cerveza partiendo de un concentrado de extracto obteniéndose un producto correcto, pero la elaboración a partir de extracto proporciona poca intervención por parte del alumno (no se interviene en la realización de la receta, ni molienda, ni macerado), según esto, en el curso 2012-13 se planteó ampliar la fabricación en planta piloto partiendo de cebada como materia prima para ser malteada, debido a la falta de experiencia en esta etapa, se obtuvieron productos no muy conseguidos e incluso defectuosos. Se decidió completar ese curso con una elaboración desde extracto como ya se hizo en 2011-12. En el curso 2013-14, partiendo de la experiencia adquirida en los cursos posteriores, se apostó por la ampliación de dicha planta piloto incluyendo la elaboración de cerveza sin gluten a partir de mijo, con la consiguiente mejora de la experiencia y, por consiguiente, del producto elaborado, con un notable éxito.

La asignatura "Experimentación en Planta Piloto" quedó extinta en el curso 2013/2014 debido al cambio de planes de estudios. Sin embargo, las instalaciones existentes desarrolladas durante los años anteriores, así como el automatizado del malteado que se desarrolla en este proyecto, podrán ser usadas por alumnos que deseen realizar su proyecto fin de carrera/grado/máster referido a algún proceso relacionado con estas

industrias y para la realización de experiencias prácticas en la asignatura del Máster de Ingeniería Química “Biotecnología”.

En el curso 2014-2015 Gonzalo Romero Millán, compañero y amigo de la facultad desarrolló un trabajo completo para la elaboración de cerveza, dejando un completo manual de elaboración, así como material, documentación y ayuda personal para la realización de los proyectos posteriores en los cuales se dividió en cuatro partes el proceso completo de elaboración, quedándome asignada la primera parte del proceso a la cual se hace referencia en este proyecto:

“Análisis de la molienda de la malta de cebada y efectos en el rendimiento del macerado”, repartiendo el resto de partes en las cuales se incluye el resto del proceso a Arancha y Pablo.

2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO:

El objetivo del trabajo es realizar un diseño de experimentos de dos de los procesos implicados en la elaboración de cerveza artesanal para optimizar el rendimiento final de obtención de mosto de cebada para la producción de cerveza. Lo que es lo mismo, conseguir la mayor cantidad de extracto fermentable en el mosto al finalizar el macerado.

Los procesos a los cuales le vamos a realizar el estudio son la molienda y el macerado, ya que la configuración para estos dos procesos, además de ser variable, puede suponer cambios importantes a la hora recoger el resultado final.

Para ello se va a realizar un diseño de experimentos 2^4 , es decir, 16 experimentos cada uno de los cuales tendrá su resultado de rendimiento de macerado. Entre cada experimento variaremos el valor de una de las variables a estudiar (cuatro variables) entre dos niveles cada una de ellas. Nuestras variables son:

VARIABLES	NIVELES	
Tipo de molienda	Seca	Húmeda
Apertura del molino	0,75	1,5
Pasos por el molino	1 paso	3 pasos
Tiempo de macerado	60 min	90 min

Tabla 2. Variables y niveles entre los que varían.

Cada una de ellas toma dos valores distintos, de esta forma tenemos los 16 experimentos a realizar. Realizando un estudio estadístico del resultado de cada uno de los experimentos mediante el algoritmo de yates para un diseño factorial de experimentos, veremos el efecto que tiene cambiar el nivel de las variables con respecto al valor promedio, de esta forma comparamos los efectos de cada una de ellas para deducir la configuración óptima con la que obtenemos el mayor rendimiento en los procesos de molienda y macerado.

2.3 ALCANCE DEL PROYECTO:

Como hemos comentado en el apartado anterior estamos utilizando cuatro variables a dos niveles cada una, de forma que optimizamos el rendimiento teniendo en cuenta estas variaciones en la configuración. Este será el alcance de nuestro proyecto.

Hay que tener en cuenta que no estamos tratando el resto de variables que pueden afectar al rendimiento de macerado como pueden ser, pH, propiedades del agua para la templa, malteado de la cebada...Tampoco estamos teniendo en cuenta distintos niveles que podrían tomar nuestras variables de estudio como podrían ser dos pasos por el molino, 75 minutos de tiempo de macerado, distancias entre rodillos diferentes...

Por tanto, el alcance del proyecto será ver que configuración de las 16 estudiadas nos interesa más para un proceso de elaboración de cerveza.

3.METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:

Para la realización de los experimentos necesitamos cumplir una serie de condiciones que hay que tener en cuenta tanto en la molienda como en el macerado ya que estas van a ser nuestras variables para el diseño de experimentos. Se trata de, mediante experimentación en el laboratorio, realizar un ensayo con cada una de las combinaciones posibles de variables para así ver el efecto que tiene el cambio de dichas variables con respecto al resto de experimentos. Esto son 16 ensayos distintos.

Lo primero que debemos hacer al llegar al laboratorio es poner a calentar dos ollas con agua, ya que este proceso es lento y mientras el agua está calentando podemos preparar tanto el tanque de macerado como la malta para el mismo proceso.

Pesamos un kilogramo de malta, para ello cogemos “a ojo” algo más de un kilogramo en un vaso de precipitado de plástico y otro vacío, vamos a la balanza y en el vaso vacío pesamos el kilogramo.

A continuación, realizamos la molienda con las especificaciones que correspondan para el experimento que estamos tratando.

Tras la molienda, hacemos un análisis granulométrico del resultado utilizando cinco tamices con luces de malla de 1.41 mm, 1mm, 0.5mm, 0.25mm, 1.15mm más la cubeta. Para ello separamos unos 100 gramos de muestra del resultado de la molienda que los separaremos en seis fracciones utilizando los tamices disponibles.

Es importante que no queden retenidos granos intactos o apenas dañados sobre el tamiz de las cáscaras.

La calidad de la molienda nos va a afectar posteriormente no sólo en el proceso de macerado y la filtración del mosto, sino que también afecta al rendimiento de la cocción, la fermentación e incluso al color, sabor y carácter de la cerveza obtenida al final del proceso.

Ya disponemos de agua caliente suficiente y tenemos la malta preparada para el proceso de macerado. Nuestra mayor preocupación durante dicho proceso va a ser mantener la temperatura de la mezcla en torno a 65°C que

es la temperatura óptima de la β -amilasa, la enzima que más nos interesa para nuestro proceso. Esta enzima actúa en el rango 60-65°C y se desactiva rápidamente a 70°C, por tanto, es importante que mantengamos ese rango durante el tiempo de macerado.

Para ello es imprescindible precalentar la nevera, ya que, si añadimos el agua caliente a la nevera sin precalentar, vamos a perder mucha temperatura y por tanto no vamos a conseguir que la mezcla esté a la temperatura deseada. La nevera la precalentamos con agua a unos 75°C, para una vez añadida la malta, la mezcla esté en torno a los 65°C deseados.

Una vez precalentada la nevera, vaciamos el agua utilizada para precalentar y añadimos poco a poco el agua junto con la malta, agitando vigorosamente con la pala para evitar la formación de grumos.

Una vez añadida la mezcla para el macerado comprobamos que la temperatura alcanzada es la requerida, en caso contrario corregir hasta conseguirla ya sea añadiendo agua hirviendo o fría según proceda. Una vez alcanzada la temperatura de 65°C, cerramos la nevera y dejamos que transcurra el tiempo del macerado que serán 60 o 90 minutos según el experimento que estamos realizando.

Tras el macerado, pasamos al proceso de filtración del mosto, en primer lugar, tenemos que formar el lecho para que quede bien asentado, sacando el mosto y devolviéndolo al tanque de macerado de forma uniforme y suave para evitar romper el lecho. La recirculación la realizamos por la parte superior del tanque suavemente y en forma de ducha lentamente, ya que tenemos que cuidar que nuestro lecho no se estropee debido a la caída del mosto sobre él, lo que daría problemas a la hora de fluir el mosto sobre el lecho teniendo caminos preferenciales. Continuaremos con este proceso hasta conseguir un mosto claro y uniforme, aproximadamente dos o tres litros de mosto recirculados será suficiente.

Una vez asentado el lecho filtrante se procede a la aspersion/rociado que consiste en purgar mosto a través del grifo colocado en la parte inferior del tanque a la vez que se rocía agua en forma de ducha uniforme en toda la superficie del macerador. Es importante que el caudal de agua caliente

añadida sea igual o al menos lo más parecido posible al mosto que sacamos para su medida. Para ello disponemos de una bomba peristáltica que nos proporciona un caudal constante. Haciendo una sencilla prueba vemos el caudal que nos proporciona el grifo de agua del macerador obteniendo los siguientes resultados: 100ml – 12 segundos, 500 ml – 60 segundos, estamos obteniendo un caudal de 0,5 litros por minuto así que ajustaremos la bomba peristáltica para que nos proporcione dicho caudal. Cada litro que sacamos del tanque de macerado le hacemos una medida de densidad en grados Brix para comprobar la evolución, continuamos con dicho proceso hasta alcanzar una densidad de aproximadamente 1 grado Brix. Una vez alcanzada dicha densidad hemos terminado con el proceso de rociado/aspersión.

Todo el mosto que hemos conseguido lo hemos estado añadiendo en una olla limpia, a continuación, hacemos una medida de volumen total, grado Brix y grado Plato obtenido, que será el resultado final de nuestro experimento. El volumen lo obtenemos midiendo la altura del mosto en la olla y conociendo el diámetro de la misma.

A continuación, paso a detallar uno de los 16 experimentos realizados para que sirva como ejemplo de los datos y resultados obtenidos en cada uno de ellos, en concreto fue el primer experimento que realicé que corresponde a un solo paso por el molino, 0.75 milímetros de apertura entre rodillos, molienda seca y 60 minutos de tiempo de macerado.

Experimento número 1.

- Pasos por el molino: uno.
- Distancia entre rodillos: 0.75 milímetros.
- Tipo de molienda: seca.
- Tiempo de macerado: 60 minutos.

Como dijimos anteriormente, nada más llegar al laboratorio ponemos dos ollas de agua a calentar, a continuación, tomamos en un vaso de precipitado algo más de un kilogramo de malta y nos llevamos ese vaso junto con otro

vacío a la sala de balanzas. Colocamos el vaso vacío en la balanza, taramos y agregamos malta hasta obtener un kilogramo. En nuestro caso el peso exacto de malta es: 1,02 kilogramos.



Figura 4. Vaso de precipitado

Con los 1,2 kilogramos de malta que hemos separado para nuestro experimento pasamos al proceso de molienda. Preparamos en primer lugar el vaso donde tenemos la malta, el molino lo ajustamos a las especificaciones del experimento en cuestión con la ayuda de un calibre, en este caso lo ajustamos a 0,75 milímetros además de un vaso de precipitado limpio y vacío donde dejaremos caer el producto molido. Vamos añadiendo la malta poco a poco en la tolva disponible en el molino mientras que vamos moliendo con ayuda de la manivela inferior, recogiendo el producto obtenido en el vaso de precipitado vacío. Una vez terminado el proceso, tendremos los 1,2 kilogramos de malta molidos fruto del producto del proceso de la molienda con los cuales continuamos trabajando.



Figura 5. Molino de rodillos.

A continuación, separamos 100 gramos del producto obtenido del molino, tiene que ser representativo del total, por lo que procuramos seleccionarlo lo más uniforme posible. Lo llevamos a la batería de tamices y obtenemos el siguiente análisis granulométrico:

$\lambda(\text{mm})$	Peso (gramos)	%
1.41	71.3	71.3
1	15.7	15.7
0.5	8.5	8.5
0.25	1.8	1.8
0.15	0.9	0.9
Cubeta	1.8	1.8
Total	100	100

Tabla 3. Análisis granulométrico de la molienda.



Figura 6. Tamiz utilizado

Una vez tengamos el agua a unos 75°C, precalentamos la nevera. Añadimos agua hasta prácticamente llenarla y lo dejamos reposar unos minutos, a continuación, desechamos el agua y volvemos a añadir agua, en este caso a 73°C hasta más o menos un tercio del total y comenzamos a añadir la malta junto con más agua caliente. Agitamos vigorosamente durante dicho proceso para evitar la formación de grumos. Una vez añadida toda la malta, completamos con agua hasta que la superficie del lecho de malta quede unos cinco centímetros por debajo de la superficie del agua.

Ya tenemos nuestra mezcla preparada, antes de comenzar comprobamos la temperatura de la mezcla, en este caso es de 66°C, por tanto, estamos en el rango en el que nos interesa que transcurra el proceso por lo que cerramos la tapa y comenzamos a contabilizar los 60 minutos. Durante este tiempo cada 15 minutos aproximadamente comprobamos la temperatura para que no se nos vaya demasiado, no es aconsejable añadir agua nuevamente, aunque en caso de perder mucha temperatura se puede añadir algo de agua. En este caso concreto las temperaturas son:

- 15 minutos: 64°C
- 30 minutos: 63°C
- 45 minutos: 62°C

Como vemos hemos ido perdiendo algo de temperatura debido a que la temperatura ambiente es de unos 25°C y, aunque hemos aislado térmicamente el tanque, el aislamiento no es lo suficientemente bueno. No obstante, la temperatura se mantiene dentro de nuestro rango.

El proceso de macerado ha concluido, a continuación, debemos formar el lecho filtrante. Para ello preparamos una probeta y a través del grifo situado al fondo de la nevera comenzamos a extraer mosto y a recircularlo por la parte superior con cuidado de no dañar el lecho ya que podríamos provocar caminos preferenciales a la hora de purgarlo y esto no nos interesa. Recirculamos hasta que el color del mosto que sale del grifo tenga un color uniforme. En este caso hemos recirculado 1,5 litros de mosto.

Es el momento de comenzar el rociado/aspersión. Preparamos una olla vacía donde vamos a “almacenar” el mosto que obtenemos del macerado. Previamente a todo esto, hemos calibrado la bomba peristáltica para que nos proporcione un caudal de 0,5 l/min, este caudal lo hemos obtenido realizando una sencilla prueba purgando mosto del tanque obteniendo con una probeta y un cronómetro dicho caudal de salida del tanque.



Figura 7. Rociado del mosto

Vamos a medir la evolución de la densidad del mosto cada 250 mililitros purgados. Como el caudal que purgamos es 0,5 l/min, purgaremos 250 mililitros cada 30 segundos. Por tanto, tenemos que, al mismo tiempo, encender la bomba peristáltica, abrir el grifo y encender el cronómetro, parando todo el proceso para tomar la medida de grado Brix cada 30 segundos. Tomamos nota y repetimos el proceso hasta obtener una medida de 1 ° Brix aproximadamente.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Brix	Volumen (ml)
12,1	250
11,6	500
11,3	750
11	1000
10,4	1250
9,8	1500
8,9	1750
7,6	2000
6,8	2250
5,6	2500
5,6	2750
4,7	3000
4,8	3250
3,7	3500
4	3750
2,5	4000
2,3	4250
2,7	4500
2,6	4750
1,8	5000
1,7	5250
0,8	5500

Tabla 4. Evolución de la densidad del mosto durante la purga del macerador.

Una vez terminado el proceso, tomaremos el dato de grados Brix de todo el contenido de mosto en la olla, así como la altura total de mosto, para así con el diámetro de la olla obtener el volumen final que también nos va a resultar relevante en el rendimiento total del proceso. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Altura de mosto: 10,7 centímetros.

Diámetro de la olla: 28 centímetros.

Volumen total de mosto: $\pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 10,7^2 \cdot 14^2 = 6588 \text{ cm}^2 \sim 6.6 \text{ litros}$.

Grado Brix final: 7,5

Grado Plato final: 8,1

Con esto hemos terminado el experimento y podemos pasar al siguiente. El proceso es el mismo así que únicamente voy a nombrar para que queden detalladas las condiciones de cada experimento en una tabla.

Con este diseño, quedan todas las configuraciones posibles para nuestro problema de cuatro variables con dos niveles, nuestro diseño exponencial de experimentos 2^4 .

EXPERIMENTO	PASOS	APERTURA(MM)	TIPO	TIEMPO(MIN)
1	1	0.75	Seca	60
2	3	0.75	Seca	60
3	1	1.5	Seca	60
4	3	1.5	Seca	60
5	1	0.75	Húmeda	60
6	3	0.75	Húmeda	60
7	1	1.5	Húmeda	60
8	3	1.5	Húmeda	60
9	1	0.75	Seca	90
10	3	0.75	Seca	90
11	1	1.5	Seca	90
12	3	1.5	Seca	90
13	1	0.75	Húmeda	90
14	3	0.75	Húmeda	90
15	1	1.5	Húmeda	90
16	3	1.5	Húmeda	90

Tabla 5. Configuración de los 16 experimentos.

4.RESULTADOS:

4.1 DATOS OBTENIDOS DE LOS EXPERIMENTOS.

Una vez realizados los 16 experimentos, los datos de los que disponemos son:

- La evolución de la densidad del macerado en grados Brix obtenida mientras purgábamos el mosto al finalizar el proceso.
- La densidad final del mosto una vez terminada la aspersion tanto en grados Brix como en grados Plato.
- El volumen final de mosto obtenido.
- Datos de temperatura, molienda, tamizado los cuales no van a ser relevantes a la hora de realizar los cálculos.
- El extracto potencial de la malta suministrada por intermalta que será el mismo para todos los experimentos. En este caso 0,84.

Fecha: 19/10/2015		
Parámetro	Unidad	Resultado
Humedad	%	4.5
Extracto MF sm	%	80.4
pH	pH	6.05
Viscosidad	cP	1.52
Beta-Glucanos solubles	mg/l	141
Color	EBU	3.8
Color K2	EBU	6.3
Proteína total	%	10.7
Proteína soluble	%	4.3
Kolbach	%	38

Figura 8. Dato de extracto potencial de la malta proporcionado por intermalta.

El extracto potencial de una malta es el máximo extracto que se puede sacar de un kilogramo de malta en el proceso de macerado en condiciones teóricas. Nunca vamos a llegar a conseguir este valor, pero debemos acercarnos lo máximo posible. Por tanto, podremos obtener 0,84 kilogramos de extracto como máximo del kilogramo de malta al que le realizamos la operación.

4.2 CÁLCULO DE RENDIMIENTO.

El rendimiento de nuestro macerado va a depender de la cantidad de extracto disponible en el mosto que hemos obtenido. Teniendo en cuenta que el extracto potencial de la malta utilizada es 0,84, dato proporcionado por el distribuidor, este será el máximo extracto que podemos obtener. Por tanto, teniendo en cuenta que 0,84 es el 100% de extracto disponible, simplemente obteniendo el extracto que hemos conseguido en el mosto tras la maceración, podremos obtener el rendimiento del proceso de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\text{extracto mosto}}{\text{extracto potencial}} * 100$$

Para obtener el extracto disponible en el mosto, necesitamos el volumen final de mosto obtenido en litros y el dato de densidad de dicho mosto. Con una sencilla fórmula obtenemos el extracto de nuestro mosto:

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

Donde:

V= volumen de mosto en litros.

SG= Densidad específica en gramos/litro

° P son grados plato

Dividimos entre 1000 para convertir el volumen y así coinciden las unidades de nuestra ecuación.

A continuación, realizamos dichos cálculos a cada uno de los experimentos realizados.

4.2.1 **Ensayo nº1:**

- Hemos obtenido un volumen final de mosto de 6,6 litros.
- La densidad del mosto después del macerado es 8,1 grado plato.

- El extracto potencial de la malta 0,84.
- La densidad específica expresada como gravedad específica es SG= 1,032.

$$\frac{6,6 * 1,032 * 8,1 * 10}{1000} = 0,5517$$

Que es el extracto obtenido en nuestro macerado, por tanto, el rendimiento de este primer experimento es el siguiente:

$$\eta = \frac{\text{extracto mosto}}{\text{extracto potencial}} * 100$$

$$\eta = \frac{0,5517}{0,84} * 100 = 65,67\%$$

4.2.2 Ensayo n°2:

- Volumen final de mosto 6,9 litros.
- Densidad del mosto 8,1 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84
- Densidad específica del mosto obtenido expresada en SG= 1,032

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{6,9 * 1,032 * 8,1 * 10}{1000} = 0,577$$

Extracto obtenido del proceso de macerado. Por tanto, el rendimiento será:

$$\eta = \frac{0,577}{0,84} * 100 = 68,66\%$$

4.2.3 Ensayo n°3:

- Volumen de mosto obtenido 7,6 litros.
- Densidad del mosto 7 ° Plato.
- Extracto potencial 8,4.
- Densidad expresada en SG= 1,028.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,6 * 1,028 * 7 * 10}{1000} = 0,5469$$

Este es el extracto obtenido en el tercer experimento, lo que nos da un rendimiento de:

$$\eta = \frac{0,5469}{0,84} * 100 = 65,11\%$$

4.2.4 Ensayo n°4:

- Volumen de mosto obtenido 7,5 litros.
- Densidad del mosto 8,5 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,034.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,5 * 1,034 * 8,5 * 10}{1000} = 0,659$$

$$\eta = \frac{0,6599}{0,84} * 100 = 78,47\%$$

4.2.5 Ensayo nº5:

- Volumen de mosto obtenido 7,1 litros.
- Densidad del mosto 8,4 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,034.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,1 * 1,034 * 8,4 * 10}{1000} = 0,6167$$

$$\eta = \frac{0,6167}{0,84} * 100 = 73,4\%$$

4.2.6 Ensayo nº6:

- Volumen de mosto obtenido 7,1 litros.
- Densidad del mosto 8 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,028.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,1 * 1,028 * 8 * 10}{1000} = 0,5839$$

$$\eta = \frac{0,5839}{0,84} * 100 = 69,51\%$$

4.2.7 Ensayo n°7:

- Volumen de mosto obtenido 7,6 litros.
- Densidad del mosto 7,8 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,031.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,6 * 1,031 * 7,8 * 10}{1000} = 0,6111$$

$$\eta = \frac{0,6111}{0,84} * 100 = 72,76\%$$

4.2.8 Ensayo n°8:

- Volumen de mosto 7,1 litros.
- Densidad del mosto 8,2 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,032.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,1 * 1,032 * 8,2 * 10}{1000} = 0,6008$$

$$\eta = \frac{0,6008}{0,84} * 100 = 71,52\%$$

4.2.9 Ensayo n°9:

- Volumen de mosto obtenido 7,7 litros.
- Densidad del mosto 8,4 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,034.

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,7 * 1,034 * 8,4 * 10}{1000} = 0,6688$$

$$\eta = \frac{0,6111}{0,84} * 100 = 79,62\%$$

4.2.10 Ensayo n°10:

- Volumen de mosto 6,9 litros.
- Densidad del mosto 9,2 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,036.

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{6,9 * 1,036 * 9,2 * 10}{1000} = 0,6577$$

$$\eta = \frac{0,6577}{0,84} * 100 = 78,29\%$$

4.2.11 Ensayo nº11:

- Volumen de mosto 6,9 litros.
- Densidad del mosto 8,2 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,032.

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{6,9 * 1,032 * 8,2 * 10}{1000} = 0,5839$$

$$\eta = \frac{0,5839}{0,84} * 100 = 69,51\%$$

4.2.12 Ensayo nº12:

- Volumen de mosto 7,6 litros.
- Densidad del mosto 8,3 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,032.

$$V * SG * ^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,6 * 1,032 * 8,3 * 10}{1000} = 0,6510$$

$$\eta = \frac{0,6510}{0,84} * 100 = 77,50\%$$

4.2.13 Ensayo n°13:

- Volumen de mosto 7,3 litros.
- Densidad del mosto 7,9 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,031.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,3 * 1,031 * 7,9 * 10}{1000} = 0,5946$$

$$\eta = \frac{0,5946}{0,84} * 100 = 70,78\%$$

4.2.14 Ensayo n°14:

- Volumen de mosto 7 litros.
- Densidad del mosto 8,1 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,032.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7 * 1,032 * 8,1 * 10}{1000} = 0,5851$$

$$\eta = \frac{0,5851}{0,84} * 100 = 69,66\%$$

4.2.15 Ensayo nº15:

- Volumen de mosto 6,7 litros.
- Densidad del mosto 9,4 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica SG= 1,037.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{6,7 * 1,037 * 9,4 * 10}{1000} = 0,6531$$

$$\eta = \frac{0,6531}{0,84} * 100 = 77,75\%$$

4.2.16 Ensayo nº16:

- Volumen de mosto 7,6 litros.
- Densidad del mosto 8,3 ° Plato.
- Extracto potencial 0,84.
- Densidad específica del mosto SG= 1,033.

$$V * SG * {}^{\circ}P * 10/1000$$

$$\frac{7,6 * 1,033 * 8,3 * 10}{1000} = 0,6516$$

$$\eta = \frac{0,6516}{0,84} * 100 = 77,57\%$$

Hay que destacar que para la transformación de ° Plato a densidad específica hemos utilizado la tabla del libro “Brewing Science and practice” de la que destacamos la parte que nos interesa para nuestro estudio ya que la tabla es mucho más extensa.

Specific gravity conversion table for cane sugar solutions

Plato	
SG 20°C	Cane sugar (% w/w, Brix)
1.00250	0.641
1.00499	1.281
1.00748	1.918
1.00998	2.552
1.01247	3.185
1.01496	3.814
1.01745	4.439
1.01993	5.063
1.02242	5.682
1.02490	6.300
1.02740	6.917
1.02989	7.529
1.03238	8.140
1.03486	8.748
1.03736	9.352

Figura 9. Conversión de gravedad específica a grado plato.

Con esto, tenemos el rendimiento de macerado de los 16 experimentos realizados, los cuales vamos a reflejar en una tabla para verlo más compacto.

Exp.	Vol (l)	° plato	SG	Ext. Potencial	Ext. Obtenido	η (%)
1	6,6	8,1	1,032	0,84	0,5517	65,67
2	6,9	8,1	1,032	0,84	0,577	68,66
3	7,6	7	1,028	0,84	0,5469	65,11
4	7,5	8,5	1,034	0,84	0,659	78,47
5	7,1	8,4	1,034	0,84	0,6167	73,4
6	7,1	8	1,028	0,84	0,5839	69,51
7	7,6	7,8	1,031	0,84	0,6111	72,76
8	7,1	8,2	1,032	0,84	0,6008	71,52
9	7,7	8,4	1,034	0,84	0,6688	79,62
10	6,9	9,2	1,036	0,84	0,6577	78,29
11	6,9	8,2	1,032	0,84	0,5839	69,51
12	7,6	8,3	1,032	0,84	0,6510	77,5
13	7,3	7,9	1,031	0,84	0,5946	70,78
14	7	8,1	1,032	0,84	0,5851	69,66
15	6,7	9,4	1,037	0,84	0,6531	77,75
16	7,6	8,3	1,033	0,84	0,6516	77,57

Tabla 6. Resultado detallado de los experimentos.

4.3 Algoritmo de Yates.

1. Una vez calculados los rendimientos de cada uno de los experimentos, el siguiente paso es ver el efecto que tiene en el rendimiento el cambio de cada una de las variables para comprobar cuál de ellos es significativo, o lo que es lo mismo, ver que variables de las estudiadas nos interesa modificar de su valor predeterminado para obtener cambios en el resultado final.

En el caso de más de tres variables, existen dos maneras rápidas y sencillas de calcular los efectos, ya sean efectos principales o efectos entre interacciones de variables de todo tipo, que son:

- El algoritmo de los signos o algoritmo de Box Hunter.
- El algoritmo de Yates.

El algoritmo de Yates es el que requiera menor número de operaciones y, al mismo tiempo, es el más adecuado para implementarlo en una hoja de cálculo o cualquier programa de ordenador.

La aplicación del algoritmo se realiza de la siguiente manera:

2. Realizamos una tabla en la que la primera columna será el número de cada experimento desde el 1 al 16. A continuación agregamos cuatro columnas, cada una de ellas corresponde a una de las variables de estudio. Asignamos para cada variable un valor 1 o -1 que indica el nivel que toma dicha variable para el número de experimento en el que nos encontramos. La forma de colocar el valor que toma la variable se realiza de la siguiente manera:

- La primera variable toma valores -1, 1, -1, 1.... Es decir, cambiando su valor en cada experimento, o lo que es lo mismo, cambiamos su valor en cada fila de la tabla.
- La segunda variable, toma valores -1,-1,1,1,-1,-1,1,1,-1,-1... Es decir, cambiamos su valor cada dos filas de la tabla.

- La tercera columna cambia su valor cada cuatro filas, o cada cuatro experimentos.
- La cuarta columna cambia su valor cada ocho filas.
- La quinta columna la llamaremos columna respuesta. Su valor será el rendimiento que hemos obtenido en el experimento al que nos estamos refiriendo en cada columna.

De esta forma obtenemos la siguiente tabla, Tabla 7:

Experimento	A	B	C	D	RESP
1	-1	-1	-1	-1	65,65
2	1	-1	-1	-1	68,63
3	-1	1	-1	-1	65,08
4	1	1	-1	-1	78,44
5	-1	-1	1	-1	73,38
6	1	-1	1	-1	69,48
7	-1	1	1	-1	72,73
8	1	1	1	-1	71,49
9	-1	-1	-1	1	79,59
10	1	-1	-1	1	78,26
11	-1	1	-1	1	69,48
12	1	1	-1	1	77,46
13	-1	-1	1	1	70,57
14	1	-1	1	1	69,63
15	-1	1	1	1	77,72
16	1	1	1	1	77,54

Tabla 7. Algoritmo de Yates, primera parte.

Donde tenemos los dieciséis experimentos cada uno con una configuración de variables diferentes y con su valor de rendimiento obtenido en el experimento en cuestión. Tener en cuenta que hemos llamado a la variable pasos por el molino como A, que toma el valor -1 para un paso y 1 para tres pasos, la variable B es la distancia entre los rodillos del molino, toma valor -1 para 0,75 milímetros y 1 para 1,5 milímetros, la variable C es el tipo de molienda con su valor -1 para molienda en seco y 1 para molienda húmeda mientras que la variable D es el tiempo de macerado que será 60 minutos el valor -1 y 1 para 90 minutos.

3. Añadimos una columna auxiliar por cada variable de estudio. Dichas columnas auxiliares se completan de la siguiente forma:

Empezaremos a completar las columnas de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, es decir, empezaremos por la casilla de arriba de la columna número 1 y rellenaremos dicha columna hasta llegar a la última casilla de abajo, a continuación pasaremos a la columna número dos y empezaremos a rellenar desde la casilla de arriba hasta llegar abajo, así sucesivamente hasta terminar en la casilla de más abajo de la última columna que en nuestro caso será la cuarta columna ya que tenemos cuatro variables. Ahora vemos como se calcula el valor de cada casilla:

Dividimos la primera columna en dos partes, la mitad de arriba y la mitad de abajo, la primera mitad de valores se rellenan con la suma de dos valores de la columna respuesta consecutivos, es decir, el primer valor será la suma del primer valor y el segundo valor de la columna respuesta, el segundo valor será la suma del tercer y cuarto valor de la columna respuesta. De esta forma sumando pares de valores de la columna respuesta llegaremos a completar la mitad superior de la columna número 1 de nuestro algoritmo.

La mitad inferior se completa del mismo modo, pero en este caso restando valores de la columna respuesta de la siguiente forma. El primer valor, que será la casilla número 8 de la primera columna del algoritmo de Yates será el resultado de restar el segundo valor menos el primer valor de la columna respuesta, la casilla número 9 será el resultado de restar el cuarto valor menos el tercer valor de la columna respuesta, y así sucesivamente.

Con esto tenemos completada la primera columna auxiliar que hemos añadido a nuestra matriz para la resolución del algoritmo. A continuación, pasamos a rellenar la segunda columna.

La segunda se rellena del mismo modo que la primera, pero utilizando como columna para el cálculo, la primera columna auxiliar. Es decir, en vez de utilizar la columna respuesta, utilizamos la columna que acabamos de rellenar a partir de ella. De forma que sumando los valores de la primera columna auxiliar dos a dos rellenaremos los valores de la mitad superior de la segunda

columna auxiliar, mientras que restando los valores dos a dos (siempre el de abajo menos el de arriba) rellenamos la mitad inferior de la segunda columna del algoritmo.

Del mismo modo rellenaremos la columna número tres utilizando la columna número dos y una vez tengamos completa la columna tres, rellenaremos al cuarta y última columna utilizando los valores obtenidos en la columna número tres.

4. Añadimos otra columna que llamaremos divisor (Div) dicha columna toma el valor 16 en la primera fila y 8 en el resto.
5. La siguiente columna la llamamos efecto y es la más importante de todas, de ella sacaremos las conclusiones del algoritmo. La forma de rellenarla es dividiendo en cada fila su valor de la columna cuatro del algoritmo entre su valor de la columna divisor.
6. Asignamos a cada fila su identidad de la siguiente forma, la primera fila será media y a continuación rellenamos de abajo a arriba: A,B,AB,C,AC,BC,ABC,D,AD,BD,ABD,CD,ACD,BCD,ABCD. Teniendo en cuenta que cada letra corresponde a una variable la tabla queda de la siguiente manera (tabla 8.):

RESP	I	II	III	IV	DIV	EFEECTO	ID
65,65	134,28	277,8	579,87	1162,47	16	72,654375	media
68,63	143,52	302,07	582,6	16,73	8	2,09125	pasos
65,08	142,86	287,14	11,2	14,75	8	1,84375	λ
78,44	144,22	295,46	5,53	23,11	8	2,88875	pasos, λ
73,38	157,85	16,34	10,6	32,59	8	4,07375	tipo
69,48	146,94	-5,14	4,15	-29,25	8	-3,65625	pasos,tipo
72,73	140,2	6,65	13,04	18,09	8	2,26125	λ ,tipo
71,49	155,26	-1,12	10,07	-16,27	8	-2,03375	pasos, λ ,tipo
79,59	2,98	9,24	24,27	2,73	8	0,34125	tm
78,26	13,36	1,36	8,32	-5,67	8	-0,70875	pasos,tm
69,48	-3,9	-10,91	-21,48	-6,45	8	-0,80625	λ ,tm
77,46	-1,24	15,06	-7,77	-2,97	8	-0,37125	pasos, λ ,tm
70,57	-1,33	10,38	-7,88	-15,95	8	-1,99375	tipo,tm
69,63	7,98	2,66	25,97	13,71	8	1,71375	pasos,tipo,tm
77,72	-0,94	9,31	-7,72	33,85	8	4,23125	λ ,tipo,tm
77,54	-0,18	0,76	-8,55	-0,83	8	-0,10375	pasos, λ ,tipo,tm

Tabla 8. Algoritmo de Yates, segunda parte.

Un esquema reducido del algoritmo de Yates, aunque en el caso del esquema es un diseño de tan sólo ocho experimentes (2^3), resulta bastante interesante ya que representa el método de resolución de forma gráfica se observa en la figura 11:

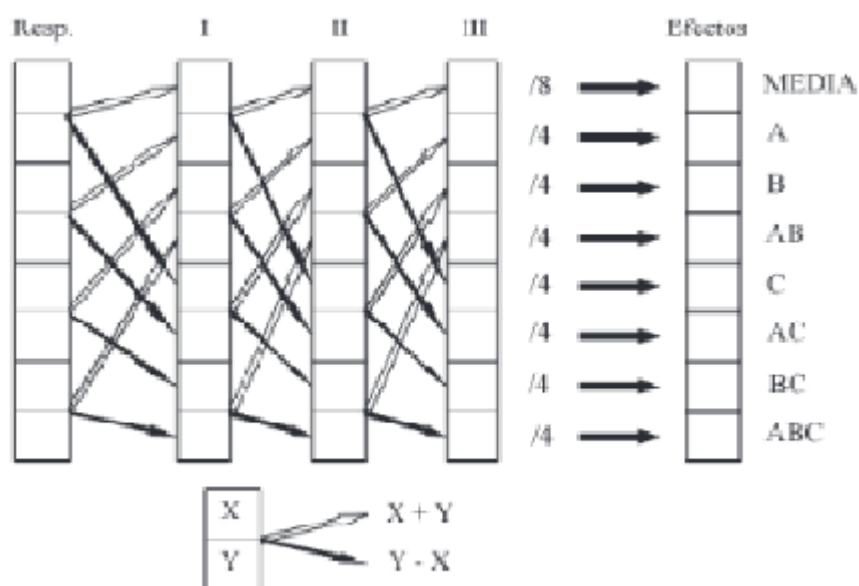


Figura 10. Esquema del algoritmo de Yates 2^3 .

7. A continuación, ordenamos los efectos de menor a mayor, empezando por los más negativos hasta llegar al positivo mayor que siempre va a ser la media. Obteniendo la siguiente tabla (tabla 9):

EF	ID	ORDEN	PROB
-3,65625	pasos,tipo	1	3,33
-2,03375	tipo,tm	2	10
-1,99375	pasos, λ ,tipo	3	16,67
-0,80625	λ ,tm	4	23,33
-0,70875	pasos,tm	5	30
-0,37125	pasos, λ ,tm	6	36,67
-0,10375	pasos, λ ,tipo,tm	7	43,33
0,34125	tm	8	50
1,71375	pasos,tipo,tm	9	56,67
1,84375	λ	10	63,33
2,09125	pasos	11	70
2,26125	λ ,tipo	12	76,67
2,88875	pasos, λ	13	83,33
4,07375	tipo	14	90
4,23125	λ ,tipo,tm	15	96,67
72,654375	media		

Tabla 9. Algoritmo de Yates, tercera parte.

8. El último paso del algoritmo antes de sacar ninguna conclusión es realizar una representación gráfica con los valores de la columna respuesta y la probabilidad de cada respuesta que rellenamos de la siguiente forma, tabla 10:

pasos,tipo	-3,65625	3,33
tipo,tm	-2,03375	10
pasos, λ ,tipo	-1,99375	16,67
λ ,tm	-0,80625	23,33
pasos,tm	-0,70875	30
pasos, λ ,tm	-0,37125	36,67
pasos, λ ,tipo,tm	-0,10375	43,33
tm	0,34125	50
pasos,tipo,tm	1,71375	56,67
λ	1,84375	63,33
pasos	2,09125	70
λ ,tipo	2,26125	76,67
pasos, λ	2,88875	83,33
tipo	4,07375	90
λ ,tipo,tm	4,23125	96,67

Tabla 10. Algoritmo de Yates, última parte.

Cuya representación gráfica es la siguiente, figura 10:

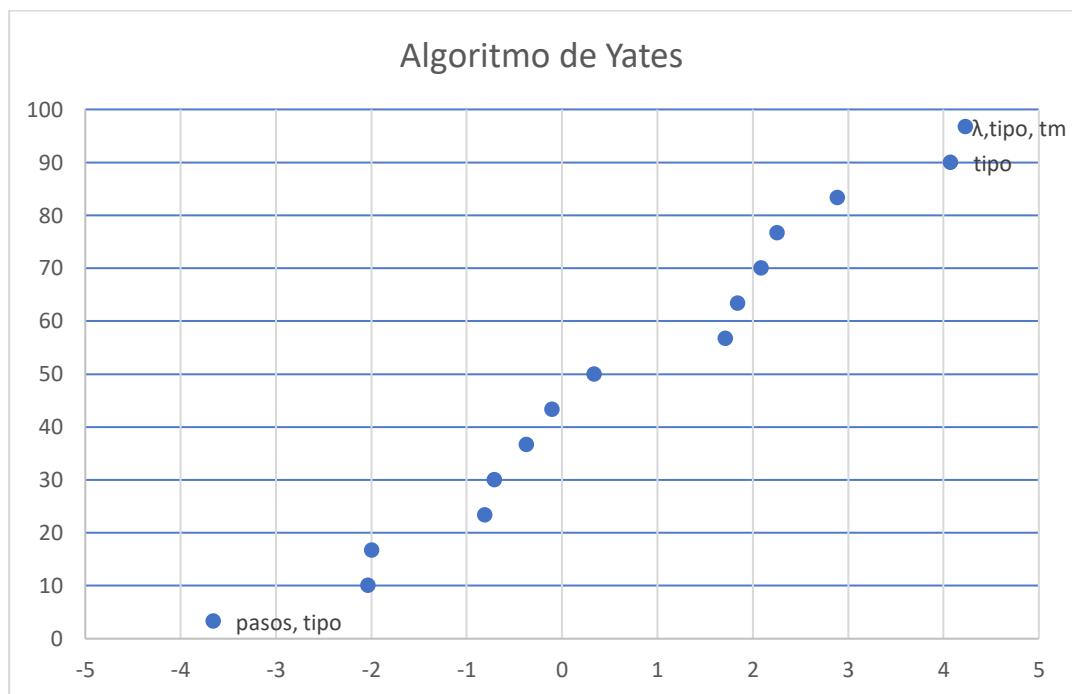


Figura 11. Representación gráfica algoritmo de Yates.

En dicho gráfico tenemos representados los efectos de cada experimento con su probabilidad, la línea pasa por el punto (0,50) y trata de alinear los efectos más cercanos a ella.

Ahora se trata de mediante observaciones en dicho gráfico, ver que efectos son significativos. Hay que comentar que sería conveniente hacer dicha representación en un papel probabilístico normal ya que al presentar en él datos provenientes de una ley normal, los puntos quedarán prácticamente alineados.

Por tanto, una vez calculados los efectos, la primera tarea, mediante la técnica estadística más adecuada, será distinguir cuales son significativamente distintos de cero y cuáles no lo son. El cálculo de los efectos es una combinación lineal de las observaciones (la diferencia entre dos medias, cada una con la mitad de observaciones) y, por tanto, de acuerdo con la fórmula de la varianza de los efectos, ésta es tanto menor cuanto mayor es el número de observaciones que se ha utilizado al calcularla.

En nuestro gráfico podemos ver cómo la mayoría de los puntos están prácticamente alineados, mientras que tenemos tres puntos que se alejan de dicha línea. Estos son los experimentos con efectos significativos. Dichos puntos corresponden a las siguientes variables:

- Pasos, tipo de molienda. Efecto= -3,66.
- Tipo de molienda. Efecto= 4,07.
- Distancia entre rodillos, tipo de molienda, tiempo de macerado. Efecto= 4,23.

Por tanto, estamos sacando los efectos de las variables o combinación de variables que cambiando su configuración para la realización de los experimentos vamos a obtener cambios significativos en el rendimiento de macerado. Como vemos, el tipo de molienda aparece en los tres puntos lo cuál es poco concluyente, ya que mirando el punto del gráfico en el que está representado el efecto de dicha variable por separado, vemos que el efecto es 4,07, de lo cual podríamos deducir que pasar de molienda seca a molienda húmeda aumenta el rendimiento de nuestro macerado en 4%. Esto parece correcto ya que como hemos hablado en capítulos anteriores el humedecer la malta previo proceso de molienda nos proporciona elasticidad en las cáscaras lo que permite que no sean destruidas en dicho proceso lo cual ayuda a la filtración del mosto. Por tanto, esta conclusión me parece válida.

Sin embargo, el primer punto significativo, es la interacción de dos variables, pasos por el molino y tipo de molienda. Este punto tiene un efecto = -3,66. Lo cual hace indicar que pasando de un paso a tres pasos por el molino y de molienda seca a molienda húmeda nos hace perder algo más de 3,5 puntos de rendimiento. Bien, de la deducción anterior deducimos que molienda húmeda nos aumentaba el rendimiento, por tanto, este efecto contradice dicha deducción. La forma de interpretarlo creo que será que, aunque haciéndola húmeda las cáscaras sean más elásticas, haciendo pasar la malta tres veces por el molino rompemos igualmente la mayoría de ellas con su consiguiente problema de filtración y por tanto pérdida de rendimiento.

Nuestro último punto de la gráfica es la interacción de tres variables: distancia entre rodillos, tipo de molienda y tiempo de macerado. Su efecto es +4,23.

Esto nos dice a priori que cambiar la distancia entre rodillos de 0,75 a 1,5 milímetros, el tipo de molienda de seca a húmeda y el tiempo de macerado de 60 a 90 minutos, nos produce un aumento del rendimiento del macerado de 4,23 puntos. Esto puede parecer correcto, pero el problema es que sacar conclusiones del efecto de la interacción de tres factores resulta una tarea complicada. Por tanto, este resultado no es concluyente.

Mirando los efectos de las variables por separado:

- Pasos por el molino, efecto 2,09.
- Distancia entre rodillos, efecto 1,84.
- Tipo de molienda, efecto 4,07.
- Tiempo de macerado, efecto 0,34.

Podemos sacar alguna conclusión de ellos. Del primero vemos que haciendo tres pasos por el molino en lugar de uno el rendimiento aumenta en dos puntos aproximadamente con lo cual es más interesante hacer tres pasos. Pero teniendo en cuenta que, al realizar dicho cambio en la configuración junto con otros cambios, como por ejemplo hacer la molienda húmeda, estamos perdiendo en torno a 3,5 puntos en el rendimiento final. Por tanto, es interesante hacer tres pasos, pero sin cambiar ninguna de las demás variables en principio.

Del mismo modo, vemos que hacer la distancia entre rodillos de 1,5 milímetros nos aumenta el rendimiento de la operación hasta casi 2 puntos porcentuales, esto nos hace la molienda más gruesa lo cual disminuye la superficie específica de ataque para las enzimas, aunque mejora la calidad del lecho a la hora de la aspersión del mosto. No me parece una deducción concluyente en este caso.

El efecto del tipo de molienda ya se ha comentado y parece una deducción correcta. Hacer la molienda húmeda me mejora el macerado.

Mientras que, por último, aumentar el tiempo de macerado de 60 a 90 minutos, tiene un efecto en el rendimiento de aumentar 0,34 puntos. Lo cual no me parece para nada significativo ya que dicho aumento es prácticamente inapreciable. En este caso el tiempo de actuación para las enzimas es mayor, aunque es bastante más complicado mantener las condiciones óptimas para su actuación en las condiciones disponibles en el laboratorio.

5.CONCLUSIONES:

Cómo ya se ha comentado en las deducciones obtenidas del Algoritmo de Yates podríamos decir que modificar cada una de las variables por separado, nos mejora las condiciones para la operación con un aumento del rendimiento significativo en el caso de:

- Tres pasos por el molino.
- 1,5 milímetros de la distancia entre rodillos.
- Molienda húmeda.

Sin embargo, el efecto de la interacción entre variables es, normalmente, negativo. Excepto en el caso de la interacción de tres (distancia entre rodillos, tipo de molienda y tiempo de macerado) lo cual tiene el mayor efecto en nuestro algoritmo y debería ser la configuración óptima para la elaboración de cerveza. Esto no es concluyente ya que no podemos sacar conclusiones claras de la interacción de tres factores, no obstante, creo que la conclusión tras la resolución de nuestro problema en cuestión sería decir que:

“La configuración óptima para la realización de mosto en el proceso de elaboración de cerveza teniendo en cuenta nuestras cuatro variables es”:

- 1 paso por el molino.
- 1,5 milímetros de distancia entre rodillos.
- Molienda húmeda.
- 90 minutos de tiempo de macerado.

Sería interesante, para el caso de estas las tres variables cuyo efecto individual es significativo que son: pasos por el molino, distancia entre rodillos y tipo de molienda, realizar de nuevo ensayos en los que podamos ver la configuración óptima para ellas. Variaremos dichas variables una a una dejando el resto fijas para ver de cada una de las cuál es su nivel óptimo.

Por tanto, de cada variable hemos obtenido su posición óptima, ahora realizar un experimento con dicha configuración y ver el resultado.

Es posible que, de este modo obtengamos resultados más fáciles de interpretar y se vean más claros los efectos de la interacción de variables.

En el caso del tiempo de macerado, no parece ser significativo por tanto no buscaremos de nuevo su efecto.

Esto nos plantea un nuevo diseño de experimentos 2^3 en el que se realizarían 8 ensayos del que podríamos sacar nuevos efectos de cada una de las variables. Este diseño es menos tedioso que el anterior, y según lo que hemos obtenido de nuestro diseño de experimentos, debería proporcionarnos información de las interacciones entre variables que nos han resultado complicado de interpretar con nuestro diseño 2^4 .

minimash

American Amber Ale (6 B)

Type: All Grain

Batch Size: 5,00 l

Boil Size: 6,02 l

Boil Time: 20 min

End of Boil Vol: 5,72 l

Final Bottling Vol: 4,95 l

Fermentation: Ale, Two Stage

Taste Notes:

Date: 25 Nov 2015

Brewer:

Asst Brewer:

Equipment: MiniMash

Efficiency: 72,00 %

Est Mash Efficiency: 79,2 %

Taste Rating: 30,0

Prepare for Brewing

☐ Clean and Prepare Brewing Equipment
 ☐ Total Water Needed: 7,03 l

Mash or Sleep Grains

Mash Ingredients

Amnt	Name	Type	#	%IBU
1,00 kg	Pilsen (2 Row) SEV (3,8 EBC)	Grain	1	100,0 %

Mash Steps

Name	Description	Step Temperature	Step Time
Mash In	Add 3,01 l of water at 73,7 C	65,0 C	60 min

☐ Fly sparge with 4,02 l water at 75,8 C
 ☐ Add water to achieve boil volume of 6,02 l
 ☐ Estimated pre-boil gravity is 1,041 SG
 ☐ Estimated Post Boil Vol: 5,72 l and Est Post Boil Gravity: 1,044 SG

Cool and Transfer Wort

☐ Cool wort to fermentation temperature
 ☐ Transfer wort to fermenter
 ☐ Add water if needed to achieve final volume of 5,00 l

Pitch Yeast and Measure Gravity and Volume

☐ Measure Actual Original Gravity _____ (Target: 1,044 SG)
 ☐ Measure Actual Batch Volume _____ (Target: 5,00 l)
 ☐ Add water if needed to achieve final volume of 5,00 l

Fermentation

☐ 25 Nov 2015 - Primary Fermentation (4,00 days at 19,4 C ending at 19,4 C)
 ☐ 29 Nov 2015 - Secondary Fermentation (10,00 days at 19,4 C ending at 19,4 C)

Dry Hop and Bottle/Keg

☐ Measure Final Gravity: _____ (Estimate: 1,010 SG)
 ☐ Date Bottled/Kegged: 09 Dec 2015 - Carbonation: Bottle with 29,12 g Corn Sugar
 ☐ Age beer for 30,00 days at 18,3 C
 ☐ 08 Jan 2016 - Drink and enjoy!

7.ANEXO II:

Tablas de conversión de grados plato a grados Brix y a densidad específica (SG).

Brix	Plato	Densidad (SG)	Rendimiento
0,1	0,11	1,0004	0,10
0,2	0,20	1,0008	0,20
0,3	0,30	1,0012	0,29
0,4	0,40	1,0016	0,39
0,5	0,50	1,0020	0,48
0,6	0,60	1,0023	0,58
0,7	0,70	1,0027	0,68
0,8	0,80	1,0031	0,77
0,9	0,90	1,0035	0,87
1	1,00	1,0039	0,96
1,1	1,11	1,0043	1,06
1,2	1,21	1,0047	1,16
1,3	1,31	1,0051	1,25
1,4	1,41	1,0055	1,35
1,5	1,51	1,0059	1,45
1,6	1,61	1,0062	1,54
1,7	1,71	1,0066	1,64
1,8	1,81	1,0070	1,74
1,9	1,91	1,0074	1,84
2	2,01	1,0078	1,93
2,1	2,11	1,0082	2,03
2,2	2,22	1,0086	2,13
2,3	2,32	1,0090	2,22
2,4	2,42	1,0094	2,32
2,5	2,52	1,0098	2,42
2,6	2,62	1,0102	2,52
2,7	2,72	1,0106	2,61
2,8	2,83	1,0110	2,71
2,9	2,93	1,0114	2,81
3	3,03	1,0118	2,91
3,1	3,13	1,0122	3,01
3,2	3,23	1,0126	3,10
3,3	3,34	1,0130	3,20
3,4	3,44	1,0135	3,30
3,5	3,54	1,0139	3,40
3,6	3,64	1,0143	3,50
3,7	3,75	1,0147	3,60
3,8	3,85	1,0151	3,69
3,9	3,95	1,0155	3,79
4	4,05	1,0159	3,89
4,1	4,16	1,0163	3,99
4,2	4,26	1,0167	4,09

Brix	Plato	Densidad (SG)	Rendimiento
4,3	4,36	1,0171	4,19
4,4	4,47	1,0175	4,29
4,5	4,57	1,0180	4,39
4,6	4,67	1,0184	4,49
4,7	4,78	1,0188	4,59
4,8	4,88	1,0192	4,69
4,9	4,98	1,0196	4,78
5	5,09	1,0200	4,88
5,1	5,19	1,0205	4,98
5,2	5,30	1,0209	5,08
5,3	5,40	1,0213	5,18
5,4	5,50	1,0217	5,28
5,5	5,61	1,0221	5,38
5,6	5,71	1,0226	5,48
5,7	5,82	1,0230	5,58
5,8	5,92	1,0234	5,68
5,9	6,03	1,0238	5,78
6	6,13	1,0242	5,89
6,1	6,24	1,0247	5,99
6,2	6,34	1,0251	6,09
6,3	6,44	1,0255	6,19
6,4	6,55	1,0259	6,29
6,5	6,65	1,0264	6,39
6,6	6,76	1,0268	6,49
6,7	6,87	1,0272	6,59
6,8	6,97	1,0277	6,69
6,9	7,08	1,0281	6,79
7	7,18	1,0285	6,89
7,1	7,29	1,0289	7,00
7,2	7,39	1,0294	7,10
7,3	7,50	1,0298	7,20
7,4	7,60	1,0302	7,30
7,5	7,71	1,0307	7,40
7,6	7,82	1,0311	7,50
7,7	7,92	1,0316	7,61
7,8	8,03	1,0320	7,71
7,9	8,13	1,0324	7,81
8	8,24	1,0329	7,91
8,1	8,35	1,0333	8,01
8,2	8,45	1,0337	8,12
8,3	8,56	1,0342	8,22
8,4	8,67	1,0346	8,32

Brix	Plato	Densidad (SG)	Rendimiento
8,5	8,77	1,0351	8,42
8,6	8,88	1,0355	8,53
8,7	8,99	1,0359	8,63
8,8	9,09	1,0364	8,73
8,9	9,20	1,0368	8,83
9	9,31	1,0373	8,94
9,1	9,42	1,0377	9,04
9,2	9,52	1,0382	9,14
9,8	10,17	1,0409	9,76
9,9	10,28	1,0413	9,87
10	10,39	1,0418	9,97
10,1	10,49	1,0422	10,07
10,2	10,60	1,0427	10,18
10,3	10,71	1,0431	10,28
10,4	10,82	1,0436	10,39
10,5	10,93	1,0440	10,49
10,6	11,04	1,0445	10,59
10,7	11,14	1,0450	10,70
10,8	11,25	1,0454	10,80
10,9	11,36	1,0459	10,91
11	11,47	1,0463	11,01
11,1	11,58	1,0468	11,12
11,2	11,69	1,0473	11,22
11,3	11,80	1,0477	11,33
11,4	11,91	1,0482	11,43
11,5	12,02	1,0487	11,54
11,6	12,13	1,0491	11,64
11,7	12,24	1,0496	11,75
11,8	12,35	1,0501	11,85
11,9	12,45	1,0505	11,96
12	12,56	1,0510	12,06
12,1	12,67	1,0515	12,17
12,2	12,78	1,0519	12,27
12,3	12,89	1,0524	12,38
12,4	13,00	1,0529	12,48
12,5	13,11	1,0533	12,59
12,6	13,23	1,0538	12,70
12,7	13,34	1,0543	12,80
12,8	13,45	1,0548	12,91
12,9	13,56	1,0552	13,01
13,0	13,67	1,0557	13,12
13,1	13,78	1,0562	13,23
13,2	13,89	1,0567	13,33
13,3	14,00	1,0571	13,44
13,4	14,11	1,0576	13,55

Brix	Plato	Densidad (SG)	Rendimiento
13,5	14,22	1,0581	13,65
13,6	14,33	1,0586	13,76
13,7	14,44	1,0591	13,87
13,8	14,56	1,0595	13,97
13,9	14,67	1,0600	14,08
14	14,78	1,0605	14,19
14,1	14,89	1,0610	14,29
14,2	15,00	1,0615	14,40
14,3	15,11	1,0620	14,51
14,4	15,23	1,0625	14,62
14,5	15,34	1,0629	14,72
14,6	15,45	1,0634	14,83
14,7	15,56	1,0639	14,94
14,8	15,67	1,0644	15,05
14,9	15,79	1,0649	15,15
15	15,90	1,0654	15,26
15,1	16,01	1,0659	15,37
15,2	16,12	1,0664	15,48
15,3	16,24	1,0669	15,59
15,4	16,35	1,0674	15,69
15,5	16,46	1,0679	15,80
15,6	16,57	1,0684	15,91
15,7	16,69	1,0689	16,02
15,8	16,80	1,0694	16,13
15,9	16,91	1,0699	16,24
16	17,03	1,0704	16,35
16,1	17,14	1,0709	16,45
16,2	17,25	1,0714	16,56
16,3	17,37	1,0719	16,67
16,4	17,48	1,0724	16,78
16,5	17,59	1,0729	16,89
16,6	17,71	1,0734	17,00
16,7	17,82	1,0739	17,11
16,8	17,94	1,0744	17,22
16,9	18,05	1,0749	17,33
17	18,16	1,0754	17,44
17,1	18,28	1,0759	17,55
17,2	18,39	1,0764	17,66
17,3	18,51	1,0769	17,77
17,4	18,62	1,0775	17,88
17,5	18,73	1,0780	17,99
17,6	18,85	1,0785	18,10
17,7	18,96	1,0790	18,21
17,8	19,08	1,0795	18,32
17,9	19,19	1,0800	18,43

Brix	Plato	Densidad (SG)	Rendimiento
18	19,31	1,0806	18,54
18,1	19,42	1,0811	18,65
18,2	19,54	1,0816	18,76
18,3	19,65	1,0821	18,87
18,4	19,77	1,0826	18,98
18,5	19,88	1,0832	19,09
18,6	20,00	1,0837	19,20
18,7	20,12	1,0842	19,31
18,8	20,23	1,0847	19,42
18,9	20,35	1,0853	19,53
19	20,46	1,0858	19,64
19,1	20,58	1,0863	19,76
19,2	20,69	1,0868	19,87
19,3	20,81	1,0874	19,98
19,4	20,93	1,0879	20,09
19,5	21,04	1,0884	20,20
19,6	21,16	1,0890	20,31
19,7	21,28	1,0895	20,42
19,8	21,39	1,0900	20,54
19,9	21,51	1,0906	20,65
20	21,63	1,0911	20,76

8.BIBLIOGRAFÍA:

1. **Steve Huxley.** “La cerveza... poesía líquida. Un manual para cervesiáfilos”, 2006.
2. **Zivorad R. Lazic.** “Design of Experiments in chemical Engineering”, 2004.
3. **Dennis E. Briggs, Chris A. Boulton, Peter A. Brookes and Roger Stevens.** “Brewing, Science and practice”, 2004.
4. **Gonzalo Romero Millán.** “Manual de elaboración de malta y cerveza”. 2015.
5. **Albert Prat Bartés, Xavier Tort-Martorell Llabrés, Pere Grima Cintas, Lourdes Pozueta Fernandez, Ignasi Solé Vidal.** “Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad”, 1997.
6. **John J. Palmer.** “How to brew. Everything you need to know to brew right the first time. Brewer`s Publications”, 2006.
7. **Fernando Vidal.** “Diseño de experimentos.
8. **Wolfgang Kunze.** “Tecnología para cerveceros y malteros”m 2006
9. **John J. Palmer.** “How to brew. Everything you need to know to brew beer right the first”, 2006.