

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN
DE SACAROSA EN UNA SOLUCIÓN ACUOSA
BASADO EN REFRACTOMETRÍA**

ANGELO ALBANO REYES CARVAJAL

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2010**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN
DE SACAROSA EN UNA SOLUCIÓN ACUOSA
BASADO EN REFRACTOMETRÍA**

ANGELO ALBANO REYES CARVAJAL

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Físico**

Director

ING. MARIO MILVER PATIÑO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

2010

Nota de Aceptación

Ing. Mario Milver Patiño

Director

Lic .Claudia Marcela Camargo Antolínez

Jurado

Msc. Carlos Felipe Ordoñez Urbano

Jurado

Fecha de sustentación: Popayán, 24 de mayo de 2010.

A Ruquita, Jaime, Hermanos y demás seres queridos

Gracias por su amor

Agradecimientos

A Dios por darme la vida y por estar con mis seres queridos, amigos y familiares.

A mi familia por haberme brindado su apoyo y amor incondicionalmente en todo momento.

Al Ing. Mario Milver Patiño director del trabajo de grado por su apoyo y dedicación.

A los jurados por sus aportes y colaboración.

A los profesores del Depto. de Física por su enseñanza y consejos.

A mis amigos.

A Oscar García y Cristian Villacréz por haber compartido muchos años de esfuerzo y sacrificio.

A la universidad del Cauca

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
1. ÍNDICE DE REFRACCIÓN, REFRACTOMETRÍA Y LA ESCALA %BRIX.....	4
1.1 CONCEPTO Y DEPENDENCIA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.....	4
1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.....	7
1.2.1 Método Interferométrico.....	7
1.2.2 Método de Ángulo Crítico.....	9
1.2.3 Método de Polarización.....	11
1.2.4 Método de Desviación.....	12
1.3 REFRACTOMETRÍA.....	13
1.4 LA ESCALA %BRIX.....	14
2. MÉTODO DESARROLLADO Y ACTUALIDAD.....	17
2.1 MÉTODO IMPLEMENTADO.....	17
2.2 REFRACTÓMETRO DIGITALES DE ÁNGULO CRÍTICO.....	18
2.3 CONDICIONES DE DISEÑO.....	19

2.4 COMPONENTES UTILIZADOS	20
2.4.1 Fuente de Luz.....	20
2.4.2 Prisma.....	21
2.4.3 Sensor Óptico (Cámara Web).....	23
2.4.4 Fuente de Alimentación	24
2.4.5 Sensor de Temperatura.....	25
2.4.6 Computador.....	26
3. SISTEMA ÓPTICO DE MEDICIÓN DE SACAROSA IMPLEMENTADO	27
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA (HARDWARE).....	28
3.1.1 Etapa 1	28
3.1.2 Etapa 2	29
3.1.3 Etapa 3	30
3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA (SOFTWARE)	32
3.2.1 Adquisición de las Imágenes (Etapa I).....	35
3.2.2 Pre-procesamiento y Procesamiento de las Imágenes (Etapa II)	35
3.2.2.1 Corrección de la Imagen	36
3.2.2.2 Segmentación y Extracción de Características	37
3.2.2.3 Pre-análisis de la Imagen.....	39

3.2.3 <i>Análisis y Calibración (Etapa III)</i>	39
3.3 USO DEL SISTEMA ÓPTICO	41
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS	43
4.1 VERIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS.....	43
4.2 OTRAS MEDIDAS Y COMPARACIÓN CON EL REFRACTÓMETRO REICHERT ABBE MARK II	45
5. CONCLUSIONES	51
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	52
REFERENCIAS	53
ANEXOS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético	4
Figura 2. Dependencia con la longitud de onda del índice de refracción de varios materiales	6
Figura 3. Fundamentos ópticos de un interferómetro	8
Figura 4. Fenómeno de reflexión y transmisión de una onda electromagnética en dos medios diferentes. En la figura se aprecia que el rayo de luz incidente sufre una desviación (rayo transmitido) al pasar de un medio de menor a mayor índice de refracción	10
Figura 5. Reflexión interna y ángulo crítico. A medida que aumenta el ángulo de incidencia del rayo de luz (de izquierda a derecha), el rayo transmitido se hace más débil, mientras que el rayo reflejado se hace más fuerte	11
Figura 6. (a) Desviación lateral, (b) Desviación angular.....	12
Figura 7. Índice de Refracción vs %Brix	14
Figura 8. Esquema general del sistema óptico para medir el índice de refracción y %Brix ($\eta_1 > \eta_2$)	17
Figura 9. Posición de la línea límite entre la zona sombreada y la zona clara. Factor que determina la concentración de la muestra	18
Figura 10. Esquema del sistema óptico básico.....	20
Figura 11. Imagen del diodo led utilizado.....	21
Figura 12. Imagen del prisma equilátero	23

Figura 13. Imagen de la cámara web MSI usada	23
Figura 14. Fuente de voltaje utilizada	24
Figura 15. Imagen del sensor de temperatura utilizado	25
Figura 16. Esquema general del sistema óptico implementado para medir la concentración de sacarosa.	27
Figura 17. Esquema del circuito de alimentación del led	28
Figura 18. Izquierda. Vista lateral de la pieza plástica y metálica. Esta pieza fue extraída de un refractómetro y modificada para las necesidades del sistema óptico implementado	29
Figura 19. Imágenes de la zona sombreada y la clara, tomadas con sistema óptico utilizado. a) Bajas concentraciones (2,9%Brix). b) Altas concentraciones (52,8%Brix). Mediciones obtenidas con el sistema desarrollado	31
Figura 20. Imagen superior: sistema implementado. Imagen Inferior: componentes ópticos. Laboratorio de investigación del Grupo de Óptica y Laser, Universidad del Cauca	32
Figura 21. Etapas del software desarrollado	33
Figura 22. Etapa II del software	35
Figura 23. Espacios de Color. a) Espacio de color RGB, b) Espacio de color HSL. Imágenes libres de distorsiones y aplicación de perspectiva.....	37
Figura 24. Mascara de 3x3, utilizada para la detección de las líneas en sentido Norte-Sur	38
Figura 25. Detección de la línea límite utilizando el Pre-procesamiento y Procesamiento descrito	39

Figura 26. Rango de funcionamiento del sistema. a) Representación de las posiciones de las líneas encontradas, b) Representación de la posición de la línea para una concentración x desconocida.....	40
Figura 27. Líquidos certificados para calibración de refractómetros.	43
Figura 28. Grafica de los resultados obtenidos con el sistema óptico y el refractómetro.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de algunos refractómetros según el principio de operación	13
Tabla 2. Valores típicos en %Brix de algunos productos alimenticios.....	15
Tabla 3. Especificaciones diodo led utilizado en el sistema óptico	21
Tabla 4. Especificaciones del prisma utilizado en el sistema óptico	22
Tabla 5. Característica de la cámara web usada	24
Tabla 6. Especificaciones del sensor de temperatura.....	25
Tabla 7. Especificaciones del computador Compaq	26
Tabla 8. Características de tres muestras certificadas.....	44
Tabla 9. Resultados obtenidos con el sistema óptico implementado	44
Tabla 10. Resultados utilizando el sistema óptico para diversas concentraciones	46
Tabla 11. Resultados con el refractómetro Reichert Abbe Mark II de la Unidad de Análisis Industrial de la Universidad del Cauca	47

RESUMEN

En este trabajo de grado se diseñó e implementó un sistema óptico orientado a medir la concentración de azúcar disuelta en agua, basado en refractometría, concretamente, en el método del ángulo crítico para medir el índice de refracción de una sustancia, y en técnicas de procesamiento digital de imágenes. El funcionamiento del sistema se basó, en la variación del índice de refracción de una solución a medida que cambia la concentración de azúcar disuelta en ella.

Para la implementación del sistema fue necesario seleccionar diversos componentes que permitieron medir la concentración en un rango amplio de medición, además, se implementó un software capaz de analizar imágenes y de utilizar características como la posición de un objeto en una imagen, entre otras, para encontrar el índice de refracción de la sustancia analizada o desconocida y hacer la conversión de este parámetro a concentración (%Brix), basándose en tablas de equivalencia desarrolladas por ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis).

Los resultados se corroboraron con soluciones estandarizadas o certificadas en índice de refracción. Además, se prepararon diversas concentraciones con el fin de comparar los resultados obtenidos con el sistema desarrollado y con refractómetros comerciales.

INTRODUCCIÓN

La estandarización de los procesos industriales en busca de obtener mejores rendimientos es uno de los retos que debe afrontar la industria nacional; sin embargo, el principal inconveniente que se presenta radica en los bajos presupuestos destinados para este tipo de estudios.

En vía de éste mejoramiento, existe cada vez más la necesidad de cuantificar parámetros físicos. Es por ello, que en la industria azucarera está la necesidad de realizar mediciones de concentración de sacarosa dentro de los diferentes procesos existentes en la elaboración del azúcar, para así, optimizar la producción, estandarizar procesos, y aumentar la calidad del producto.

Un control adecuado de la concentración de sacarosa permite obtener un producto final homogéneo, es decir, cristales de azúcar uniformes, evita la caramelización de la sacarosa que se ve reflejado en el color del grano, también permite extraer la máxima cantidad de sacarosa que está presente en el jugo de caña, reduciendo así, las pérdidas de sacarosa en la transformación del producto.

El desarrollo de prototipos que midan esta variable utilizando componentes de uso comercial, permiten la disminución de importación de tecnología y por lo tanto la disminución de costos, puesto que los equipos existentes en el mercado internacional sobrepasan los presupuestos de muchas empresas, haciendo imposible la adquisición de un instrumento para tal fin. En este trabajo de grado se plantea una alternativa para medir la concentración de sacarosa disuelta en agua utilizando componentes de bajo costo y que permita obtener resultados satisfactorios.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema óptico para la medición de la cantidad de sólidos solubles en un líquido, basado en técnicas de refractometría, en el análisis de la cantidad de sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) disuelta en agua, (H_2O).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

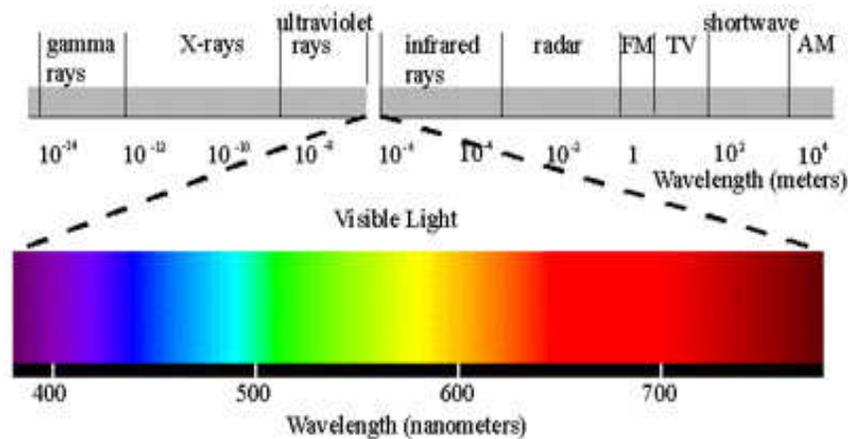
- Diseñar un sistema óptico que permita medir la variación del índice de refracción en función de la concentración de sacarosa en una solución.
- Seleccionar los componentes y/o dispositivos necesarios para la implementación del sistema.
- Implementar el sistema óptico, previamente diseñado.
- Desarrollar la aplicación necesaria para capturar, extraer y visualizar la información del sistema a partir de imágenes adquiridas.

1 ÍNDICE DE REFRACCIÓN, REFRACTOMETRÍA Y LA ESCALA %BRIX

1.1 CONCEPTO Y DEPENDENCIA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

La radiación electromagnética visible al ojo humano, generalmente llamada luz, está comprendida dentro del rango de longitudes de onda de 450nm a 700nm del espectro electromagnético, como se observa en la figura 1. Una de las propiedades físicas de la materia es el índice de refracción, esta propiedad describe la interacción de un material con la radiación electromagnética en el rango visible, y debido a que ésta interacción es en particular en cada sustancia o material, se puede medir con el objetivo de realizar una respectiva caracterización ya sea cualitativa o cuantitativa.

Figura 1. Espectro Electromagnético.



El índice de refracción absoluto o el índice refractivo (RI) [1] es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la sustancia de interés, y esta dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la onda electromagnética en el vacío ($c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$), v es la velocidad de la onda electromagnética en la sustancia de interés ($v < c$) y η es el índice de refracción.

La interacción de una onda electromagnética con los átomos que constituyen un material, dan origen a la dependencia de η respecto a su longitud de onda $\eta(\lambda)$ y a éste fenómeno se le conoce con el nombre de dispersión [2].

Para nuestro interés práctico la ecuación (2) es la ecuación de dispersión y está dada en función de $\eta(\omega)$ donde $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$, ω_0 es la frecuencia de resonancia, e es la carga del electrón, N es el número de electrones, y m_e es la masa del electrón.

$$\eta^2(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (2)$$

A partir de la ecuación anterior, se puede analizar que a frecuencias superiores a la resonancia ($\omega_0^2 - \omega^2 < 0$) el índice de refracción es menor de 1 y a frecuencias por debajo de la resonancia ($\omega_0^2 - \omega^2 > 0$) el índice de refracción es mayor que 1, esto significa que en lugar de una única frecuencia ω_0 en el que sistema resuena, existen aparentemente varias de tales frecuencias.

Para generalizar la ecuación (2), se supone que existen N moléculas por unidad de volumen, cada una con unos osciladores f_j , que tienen unas frecuencias naturales ω_{0j} donde $j = 1, 2, 3 \dots$, (es decir, frecuencias características donde el átomo puede absorber o emitir energía [3]) así:

$$\eta^2(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e} \sum_j \left(\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \right) \quad (3)$$

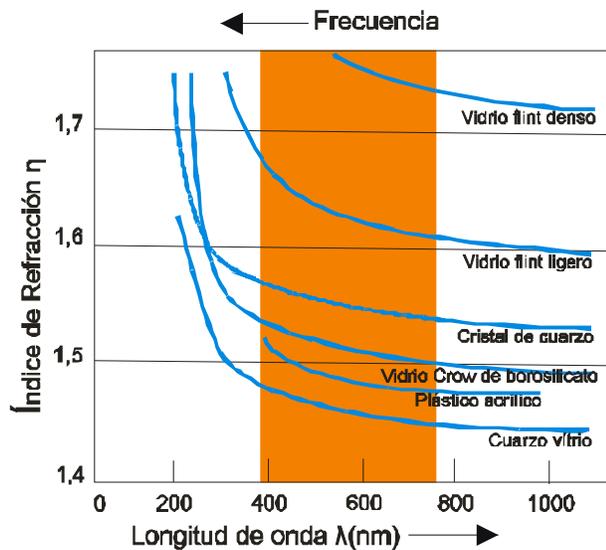
Debido a que los átomos existentes en un material denso están sujetos a los campos eléctricos inducidos por sus vecinos, se puede reescribir la ecuación 3 como:

$$\frac{\eta^2 - 1}{\eta^2 + 2} = \frac{Ne^2}{3\epsilon_0 m_e} \sum_j \left(\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \right) \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores no se ha descrito la parte compleja del índice de refracción de cada una, puesto que es de interés solo la parte donde η es real.

En la figura 2 se observa un ejemplo claro de la dependencia de η respecto a λ descrita en la ecuación (4), en ella se puede apreciar que a medida que aumenta la frecuencia también lo hace su índice de refracción, a este fenómeno se le denomina dispersión normal [4].

Figura 2. Dependencia con la longitud de onda del índice de refracción de varios materiales.



Fuente: Optics E. Hech.

Además de la dependencia descrita anteriormente, el índice de refracción de una sustancia también depende de la temperatura, esta variación depende de los grupos funcionales presentes disminuyendo en aproximadamente 0,00045 unidades al aumentar un grado Celsius la temperatura [5]. En general la disminución del η con el aumento de la temperatura se debe a la disminución de la densidad y de la constante dieléctrica del medio.

1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

La medición de índice de refracción tiene diversas aplicaciones, entre ellas se encuentra la confirmación de la identidad de sustancias, el análisis cualitativo y cuantitativo de muestras, el cálculo de propiedades de polímeros tales como el peso molecular, tamaño y forma, la medición de la pureza de sustancias y su concentración en soluciones acuosas entre otras [6].

Usualmente el índice de refracción es considerado para tres principales longitudes de onda $\lambda_D = 0,589\mu m$, $\lambda_F = 0,486\mu m$ y $\lambda_C = 0,650\mu m$ [7], es por ello que los resultados de la medición del índice de refracción se representan como η_D^{20} donde el número 20 significa la temperatura a la cual se está realizando la medición y D representa la longitud de onda utilizada de la fuente (línea D del Sodio).

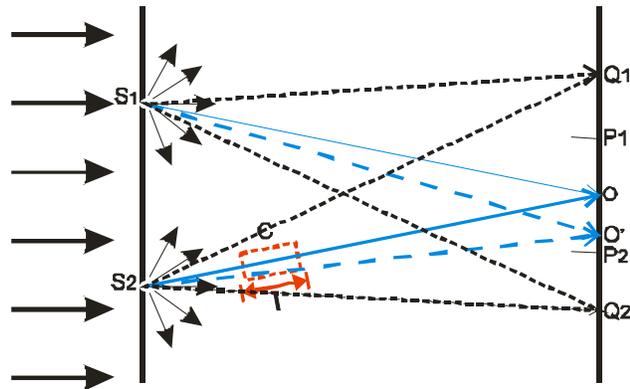
A continuación se describen algunas técnicas o métodos basados en el principio de operación existentes para la medición directa o indirecta de este parámetro:

1.2.1 Método Interferométrico

Estos métodos en general miden la diferencia entre los índices de refracción de una muestra y un patrón [8], utilizando el fenómeno de interferencia, esta medida generalmente se convierte a unidades de concentración utilizando curvas de

calibrado y muy pocas veces se utiliza para medir el índice de refracción directamente.

Figura 3. Fundamentos ópticos de un interferómetro.



Fuente: Métodos ópticos de análisis, Olsen.

Para entender esta técnica es necesario analizar la figura 3. Cuando una radiación monocromática paralela cruza dos pequeñas rendijas S_1 y S_2 , se produce difracción en cada una de ellas, es decir, cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de ondas secundarios esféricos (de la misma frecuencia que la onda primaria) [8]. Cuando no hay cubeta en la trayectoria del rayo, aparecerá una línea brillante en el punto O , al cual llegan dos haces en fase, produciendo en ese punto interferencia constructiva, y de igual forma ocurre en los puntos Q_1 y Q_2 . Para los puntos P_1 y P_2 , aparecen franjas oscuras, es decir, se ha dado lugar a la interferencia destructiva.

Ahora bien, si se coloca una muestra dentro de la cubeta C , con un $\eta > 1$ la velocidad de la luz disminuye, lo que produce un aumento en el camino óptico del haz S_2O en una cantidad Δl , definida como:

$$\Delta l = l(\eta - \eta_0) \quad (5)$$

Donde l es la longitud de la cubeta, η es el índice de refracción de la sustancia desconocida y η_0 es el índice de refracción del medio original (aire). Para estas condiciones la interferencia constructiva ahora ocurre en el punto O' y si llamamos N como el número de franjas (la franja la componen una línea oscura y otra blanca) entre los puntos O y O' para una longitud de onda dada λ , podemos calcular N a partir de la ecuación:

$$N = \frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{l(\eta - \eta_0)}{\lambda} \quad (6)$$

Si se utiliza luz blanca es posible contar las franjas presentes en el rango anteriormente descrito y si se conoce la longitud de la cubeta y el índice de refracción de referencia se puede calcular a partir de la ecuación (6) el índice de refracción de la muestra desconocida. La precisión de la medición del índice de refracción varía en el orden de $\pm 2 \times 10^{-7}$, dependiendo de las celdas utilizadas y las clases de muestras, una limitación de este método es el alcance, como por ejemplo, en los interferómetros de celda corta el alcance es de 0,05, esta es la diferencia entre los valores superiores e inferiores del campo de medida del instrumento.

1.2.2 Método de Ángulo Crítico

Cuando una onda electromagnética se propaga de un medio de índice de refracción η a otro medio con índice de refracción diferente, en la interfaz de los dos medios ocurre el fenómeno de refracción de la onda, es decir, el rayo incidente sufre una desviación en su trayectoria debido al cambio de la velocidad de propagación de la luz en ese medio, como se muestra en la figura 4.

$$\eta_{ti} = \frac{\eta_t}{\eta_i} = \frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} \quad (7)$$

La ecuación anterior (ecuación 7) se conoce como la Ley de Snell [9], esta relaciona los haces de incidencia con los transmitidos y se utiliza para deducir los índices de refracción de los dos medios, donde θ_i y θ_t son los ángulos de incidencia y de transmisión respectivamente, y η_{ti} es el índice de refracción relativo de los dos medios.

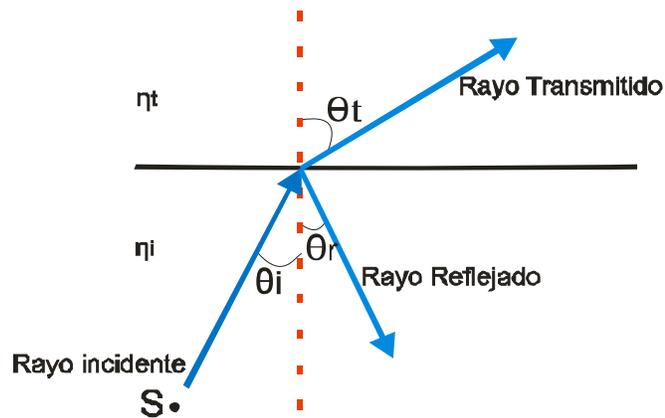


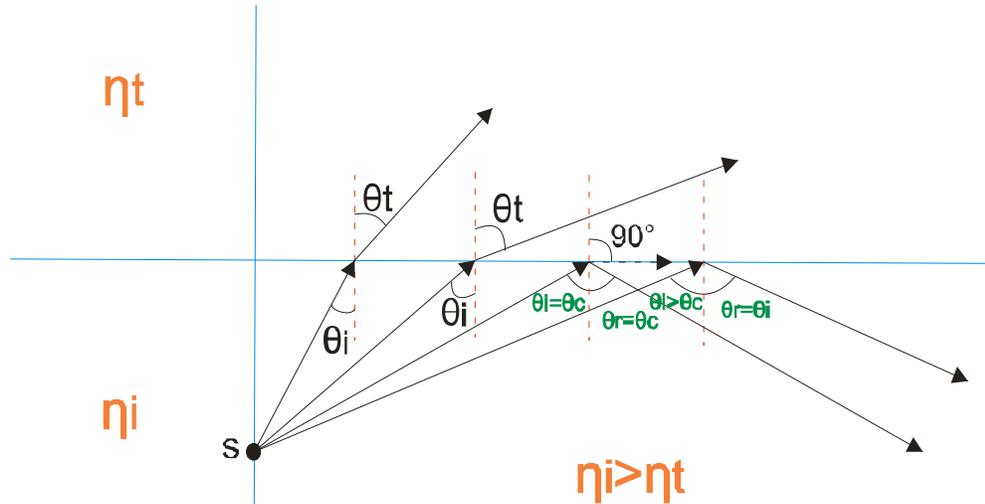
Figura 4. Fenómeno de reflexión y transmisión de una onda electromagnética en dos medios diferentes. En la figura se aprecia que el rayo de luz incidente sufre una desviación (rayo transmitido) al pasar de un medio de menor a mayor índice de refracción.

Si la onda electromagnética se propaga de un índice de refracción mayor a uno menor ($\eta_i > \eta_t$), existe un ángulo de incidencia θ_i para el cual θ_t sea igual a 90° llamado ángulo crítico θ_c , de la siguiente forma:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{\eta_t}{\eta_i} = \eta_{ti} \quad (8)$$

Para ángulos de incidencia mayores o iguales al ángulo crítico, toda la radiación incidente se refleja de nuevo hacia el medio incidente en un proceso llamado reflexión total interna, como se aprecia en la figura 5.

Figura 5. Reflexión interna y ángulo crítico. A medida que aumenta el ángulo de incidencia del rayo de luz (de izquierda a derecha), el rayo transmitido se hace más débil, mientras que el rayo reflejado se hace más fuerte.



Fuente: Introduction to optics, PEDROTTI.

El método del ángulo crítico en general se basa en el fenómeno anteriormente descrito, es decir, se utilizan diferentes sistemas para medir el ángulo crítico y conociendo el índice de refracción de uno de los dos materiales se puede obtener el desconocido de una forma relativamente fácil, y con precisiones del orden de $\pm 1 \times 10^{-4}$ a $\pm 1 \times 10^{-5}$.

1.2.3 Método de Polarización

Este método se basa en la ley de Brewster (ecuación 9) [10], la cual indica que existe un ángulo de incidencia θ_p , en el que la luz con una determinada polarización es perfectamente transmitida a través de una superficie, y sin dar origen a ninguna reflexión.

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\eta_t}{\eta_i}\right) \quad (9)$$

Donde η_t es el índice de refracción del medio de transmisión y η_i es el índice de refracción del medio incidente. La precisión del índice de refracción obtenida esta alrededor de $\pm 0,003$.

1.2.4 Método de Desviación

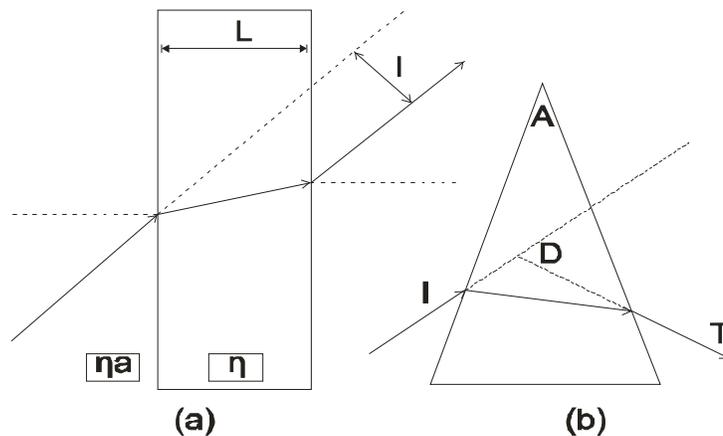
Existen dos métodos de desviación el angular y el lateral [11], estos están basados en la Ley de Snell (ecuación 7). El rayo incidente generalmente es en aire, de índice de refracción η_a .

La desviación lateral l ocurre cuando un rayo de luz es transmitido por una muestra de espesor L (ver figura 6a). Si el ángulo de incidencia es θ_a la relación de los índices de refracción es:

$$\frac{\eta}{\eta_a} = \left[1 + \left(\frac{\cos\theta_a}{\sin\theta_a - \frac{l}{L}} \right)^2 \right]^{1/2} \sin\theta_a \quad (11)$$

La precisión de este método depende de la exactitud de la medida de l , y se puede obtener una precisión de $\pm 0,001$ en el índice de refracción.

Figura 6. (a) Desviación lateral, (b) Desviación angular.



Fuente: Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, WEBSTER J.G.

En el método de desviación angular la luz incide en una cara de la muestra de índice de refracción η en forma de prisma triangular con ángulo en el vértice A , es desviada angularmente D respecto al rayo incidente (ver figura 6b), este método es basado en la ecuación (12).

$$\frac{\eta}{\eta_a} = \frac{\sin\left(\frac{A+D}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (12)$$

1.3 REFRACTOMETRÍA

La refractometría es un método óptico que se utiliza para medir el índice de refracción de una sustancia o material con el fin de caracterizarlos. Para ello, la refractometría utiliza las técnicas descritas en la sección 1.2. Los instrumentos más comunes para medir este parámetro se conocen como refractómetros (ver tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de algunos refractómetros según el principio de operación.

Principio de Operación	Nombre
Método de Ángulo Crítico	Refractómetro de Abbe.
	Refractómetro de Pulfrich.
	Refractómetro de Inmersión.
Método de Desviación	Refractómetro Diferencial.
	Refractómetro de Fisher.
Método Interferométrico	Espectrómetro de Prisma.
	Interferómetro.
	Refractómetro de Interferencia.

La refractometría se usa en el análisis de alimentos con fines de identificación y caracterización (aceites y grasas), para el control de pureza (productos químicos y distintos alimentos), y para la determinación cuantitativa de ciertos componentes [12], como por ejemplo, la determinación de la cantidad de agua que contiene la leche, el contenido de alcohol de aguardientes, vinos y cervezas, el contenido de agua en la miel, y la medición de soluciones azucaradas, entre otras.

1.4 LA ESCALA %BRIX

La escala %Brix [13] es el peso por ciento de la concentración de azúcar (sacarosa $C_{12}H_{22}O_{11}$), que corresponde al número de gramos de azúcares contenidos en 100g de solución, es decir, 25 %Brix significan que hay 25g de azúcar por 100g de líquido o de la misma forma hay 25g de azúcar y 75g de agua en 100g de solución, generalmente esta escala se utiliza en la industria azucarera, apícola y de jugos.

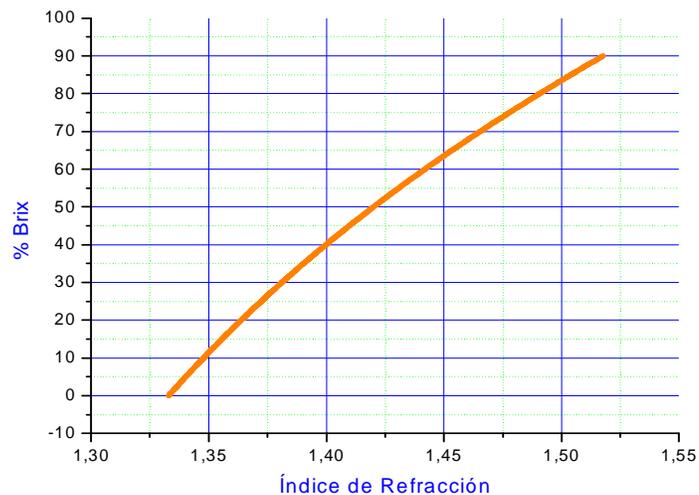


Figura 7. Índice de Refracción vs %Brix.

Ya que el índice de refracción depende la longitud de onda y de la temperatura como se aprecia en la sección 1.1, International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA) ha establecido la tabla de conversión de índice de refracción a escala %Brix, (suministrada en el anexo I), donde se relaciona la concentración de las soluciones con el índice de refracción. Es necesario recordar que esta equivalencia se realiza con fuentes de longitud de onda de $\lambda_D = 0,589\mu m$ y a una temperatura de 20°C. La gráfica 7 muestra la conversión de los parámetros anteriormente mencionados y en la tabla 2 se dan algunos ejemplos de los valores típicos de %Brix para algunos productos alimenticios.

Tabla 2. Valores típicos en %Brix de algunos productos alimenticios.

Productos de la industria alimentaria	Rango de valores típicos (%Brix)	Inexactitud (%)
Jugos: Concentrado de naranja	12-72	0,25
Concentrado de limón	12-72	0,25
Concentrado de manzana	12-72	0,25
Concentrado de uva	12-72	0,25
Mermelada de fresa	36-82	0,25
Concerva de uva	12-72	0,25
Salsa de manzana	0-25	0,12
Jugo de tomate	0-25	0,12
Pasta de tomate(debajo de 15%)	0-25	0,25
Pasta de tomate(encima de 15%)	12-72	0,5
Salsa de tomate	12-72	0,25
Extracto de carne	0-25	0,1
Leche condensada	12-72	0,25
Lactosa	0-25	0,1
Melazas	12-72	0,25
Jarabe de chocolate	12-72	0,25

Fuente: Engineers' Handbook, Process Measurement and Analysis.

Para las mediciones de índice de refracción donde las muestras a analizar estén en un valor diferente de temperatura (20°C) es necesario hacer la compensación de temperatura, debido a que la temperatura afecta a la concentración y de no realizarse se obtendrían resultados erróneos. ICUMSA ha establecido tablas que permiten compensar este probable error (Anexo II).

2. MÉTODO DESARROLLADO Y ACTUALIDAD

2.1 MÉTODO IMPLEMENTADO

El sistema óptico desarrollado se fundamenta en el método de ángulo crítico descrito en la sección 1.2, en el que se utiliza el fenómeno de reflexión total interna para medir el ángulo crítico de una sustancia bajo ciertas condiciones; un esquema general de esta técnica se aprecia en la figura 8.

La luz proveniente de una fuente S atraviesa el prisma de índice de refracción η_1 con diferentes ángulos de incidencia, y si se coloca una muestra de índice de refracción η_2 menor que η_1 en la interfaz del prisma, como se observa en la figura, se aprecia que los rayos de luz con ángulos de incidencia mayores o iguales al ángulo crítico se reflejan internamente, produciendo así una zona sombreada en la pantalla M , mientras que los otros rayos que atraviesan la muestra (rayos refractados) producen la zona clara.

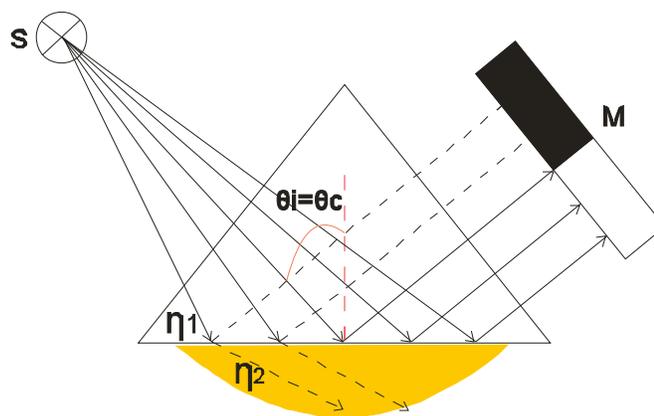


Figura 8. Esquema general del sistema óptico para medir el índice de refracción y %Brix ($\eta_1 > \eta_2$).

El ángulo de incidencia correspondiente a la línea límite entre la zona sombreada y zona clara corresponde al ángulo crítico, y a partir de este ángulo todos los rayos se reflejaran.

La posición de la línea límite es en función de la concentración, puesto que si se mide el ángulo crítico o su posición, se puede calcular el índice de refracción de la sustancia de interés a partir de la utilización de la ecuación (8).

La concentración (%Brix) de la muestra aumenta cuando la zona clara proyectada en la pantalla disminuye (ver figura 9a y 9b), es decir, el ángulo crítico se hace cada vez más grande y por consiguiente su índice de refracción (figura 7).

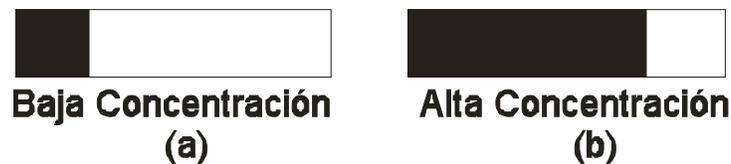


Figura 9. Posición de la línea límite entre la zona sombreada y la zona clara.
Factor que determina la concentración de la muestra.

2.2 REFRACTÓMETROS DIGITALES DE ÁNGULO CRÍTICO

Los refractómetros digitales detectan la línea límite (sección 2.1) por medio de un detector óptico (ubicado en la pantalla M) que está formado por 256 fotocélulas [14], el detector óptico envían un tren de pulsos hacia un microprocesador donde los pulsos altos corresponde a las fotocélulas iluminadas (zona clara) y los bajos a la zona oscura y de esta forma detectan la posición.

El rango de funcionamiento de estos equipos está determinado por la selección del material del prisma, también se pueden utilizar con muestras opacas y muy

viscosas, lo que les proporciona una ventaja sobre las demás clases de refractómetros.

Debido a la composición relativamente fácil de estos instrumentos, se pueden adecuar para montarlos en línea dentro de un proceso, de esta forma, se pueden utilizar en procesos claves como los alimenticios, donde es fundamental medir ésta variable en tiempo real.

2.3 CONDICIONES DE DISEÑO

Teniendo en cuenta que la escala %Brix relaciona el índice de refracción con la concentración de azúcar en una solución de agua, es necesario seleccionar los componentes que permitan cumplir las siguientes condiciones:

- Fuente de luz monocromática de $\lambda_D = 0,589\mu m$.
- Escala de medición de 0%Brix hasta 90%Brix.
- Prisma de índice de refracción alto según la escala requerida.
- Compensación de temperatura.
- Sensor para la medición de la línea límite.

Cumpliendo las anteriores condiciones, en la figura 10 se presenta un primer esquema del sistema óptico básico para la medición de la concentración de sacarosa. La variante fundamental respecto a los refractómetros digitales comerciales es el sensor utilizado para la adquisición o medición de la línea límite que es una cámara web con sensor de 640x480 en lugar de las 256 fotocélulas y el software implementado basado en procesamiento digital de imágenes.

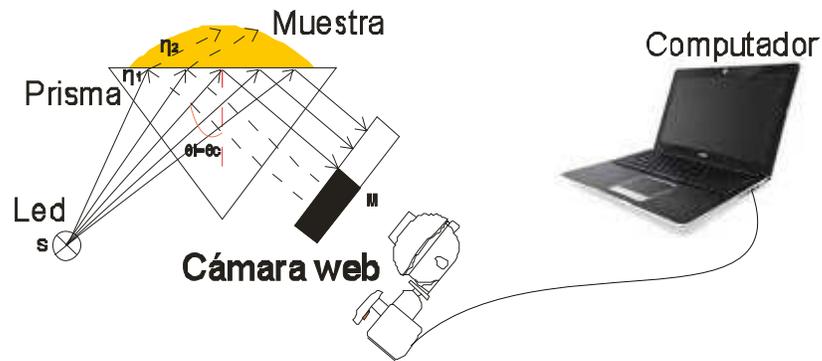


Figura 10. Esquema del sistema óptico básico.

2.4 COMPONENTES UTILIZADOS

A continuación se describen las características principales de los componentes utilizados para el sistema óptico implementado, éste se explicará con un mayor detalle en el capítulo 3.

2.4.1 Fuente de luz

A partir de análisis experimentales donde se observó el comportamiento de la línea límite que divide las zonas claras y sombreadas para diferentes concentraciones, se utilizó como fuente de iluminación monocromática para el sistema óptico, un diodo led (Light-Emitting Diode) de alta potencia de $\lambda = 589nm$ correspondiente a la línea D del sodio, las características se resumen en la tabla 3.

Las características del led, como la longitud de onda de emisión de luz, permiten medir índices de refracción a 589 nm, lo cual admite la utilización de las tablas desarrolladas por ICUMSA para la conversión de índice de refracción a concentración (%Brix).



Figura 11. Imagen del diodo led utilizado.

Tabla 3. Especificaciones diodo led utilizado en el sistema óptico.

Especificaciones	
Fabricante	Osram Opto Semiconductor
Color de iluminación	Amarillo
Longitud de onda	589 nm
Ángulo de visión	120°
Voltaje de operación	2,6 voltios
Corriente de operación Máxima	500 mA
Temperatura mínima de operación	-40 °C
Temperatura máxima de operación	+110 °C
Material led	AlGaInP
Flujo luminoso	41 lm
Intensidad luminosa	13.300 mcd
Dimensiones(Largo/Alto/Espesor)	6,8mm/6,2mm/1,8mm
Referencia	Golden Dragon LYW5SM

2.4.2 Prisma

Los prismas desempeñan muchos papeles diferentes en la óptica; sistemas polarizadores, interferómetros, entre otros. Un prisma puede servir como sistema

dispersivo; esto ocurre en muchos analizadores de espectro, es decir, es capaz de separar, hasta cierto punto, las frecuencias constitutivas en un haz luminoso policromo.

En efecto, el prisma proporciona una manera muy útil de medir $\eta(\omega)$ sobre un rango ancho de frecuencias y para una gran variedad de materiales (incluyendo gases y líquidos) [9]. Debido a lo anterior en la tabla 4 se presentan las características del prisma utilizado.

Tabla 4. Especificaciones del prisma utilizado en el sistema óptico.

Especificaciones	
Nombre	Prisma Equilátero
Dimensiones (base - largo). Ver figura 12.	(15,0 – 14,0) ± 0,1 mm
Material	N-SF11
Índice de refracción (η_D^{20})	1,785nm
Temperatura máxima de operación	503 °C
Ángulo en el vértice	60°

El índice de refracción del prisma debe ser grande, debido a que para un rango amplio de medición del índice de refracción se es necesario un prisma con esas características. A partir de las tablas de correspondencia de la escala %Brix e índice de refracción y de la ecuación (8) se observa que se requiere un prisma con un índice ligeramente mayor a 1,5177 para toda la escala %Brix.

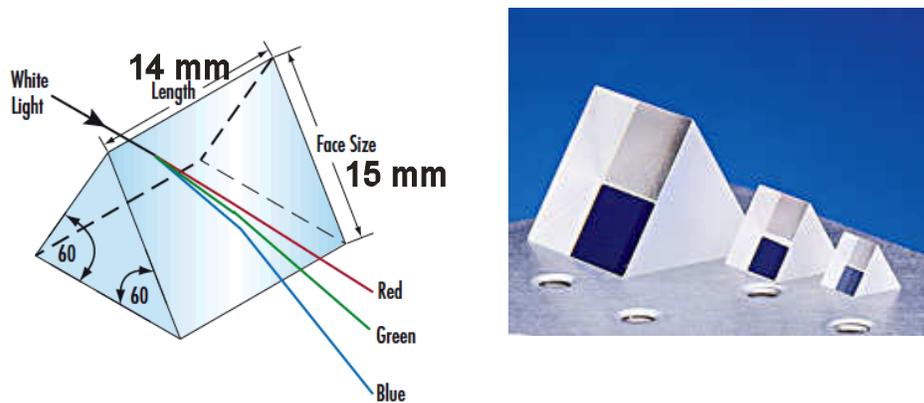


Figura 12. Imagen del prisma equilátero.

2.4.3 Sensor óptico (cámara web)

Las cámaras o sensores de imagen son los elementos encargados de captar la información luminosa de la escena, y transmitirla al computador como una señal digital [15]. Esta se utilizó para medir la posición de la línea límite entra la zona sombreada y la zona clara formada en el sistema, en la tabla 5 se resumen las características de esta.



Figura 13. Imagen de la cámara web MSI usada.

Tabla 5. Característica de la cámara web usada.

Especificaciones	
Fabricante	MSI
Nombre	Cámara web Starcam Clip
Lente	Sensor CMOS 1/4" Lente de Vidrio
Pixel	Formato VGA 640x480
Resolución	Hasta 800x600 por software 640x480, 352x288, 320x240, 176x144, 160x120
Distancia Focal	3cm~infinito
Interfaz I/O	USB 1.1
Foco de la lente	Ajustable
Temperatura de funcionamiento	+5 a +45 °C

2.4.4 Fuente de alimentación

Para la alimentación del led se utilizó la fuente de voltaje dc regulable CIC DC Power Supply ps-1930, ésta proporciona un voltaje dc estable y regulable.



Figura 14. Fuente de voltaje utilizada

2.4.5 Sensor de temperatura

En la medición de temperatura de la muestra a analizar se utilizó un termopar tipo k, este es un dispositivo formado por la unión de dos metales el cromel y el alumel, que producen un voltaje en función a la diferencia de temperatura entre ellos. En la instrumentación industrial estos dispositivos son altamente utilizados debido a su economía, a conectores estándar que utilizan, y pueden medir un amplio rango de temperaturas.

Tabla 6. Especificaciones del sensor de temperatura.

Especificaciones	
Termopar	Tipo K
Rango de funcionamiento	-40 °C a +1000°C
Exactitud	±0,1°C



Figura 15. Imagen del sensor de temperatura utilizado.

2.4.6 Computador

En el procesamiento de las imágenes adquiridas y en la implementación del software que hace parte del sistema óptico se utilizó un computador portátil marca Compaq y en la tabla 7 se presentan sus características.

Tabla 7. Especificaciones del computador Compaq.

Especificaciones	
Fabricante	Hewlett-Packard
Modelo	Compaq presario CQ45 notebook PC
Procesador	AMD Athlon X2 Dual Core QL- 60 1,90GHz
Memoria(RAM)	3,00Gb
Sistema Operativo	Windows Vista, 32 bits

3. SISTEMA ÓPTICO DE MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SACAROSA IMPLEMENTADO

El sistema óptico de medición de sacarosa basado en refractometría utilizando el método del ángulo crítico, lo conforman los componentes descritos en la sección 2.3 y 2.4. La disposición y ubicación final de ellos se estableció realizando un sin número de pruebas que permitieron obtener las mejores condiciones y resultados para la medición de este parámetro. En la figura 16 se aprecia el esquema del sistema implementado y su respectiva descripción se hace a continuación.

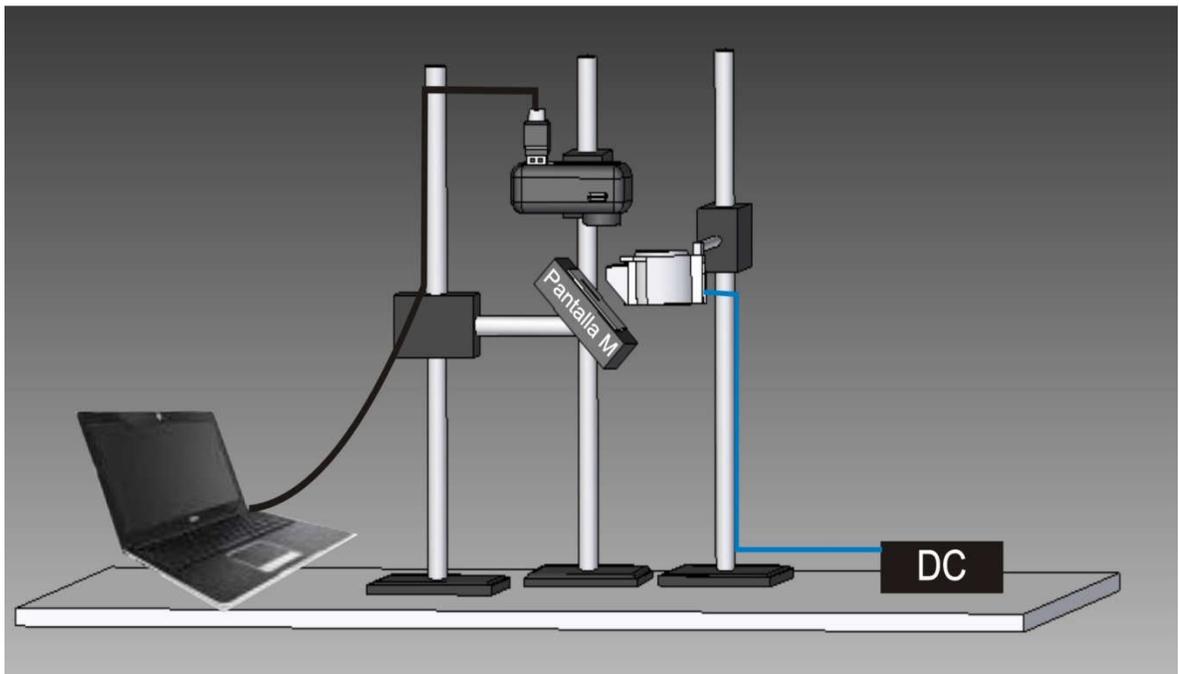


Figura 16. Esquema general del sistema óptico implementado para medir la concentración de sacarosa.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA (HARDWARE)

El sistema se ha dividido en tres etapas para una adecuada comprensión y descripción de los elementos utilizados. La primera etapa corresponde a la alimentación del diodo led, la segunda etapa abarca tres componentes el led, el prisma y el porta-muestra, y la tercera etapa la conforma la pantalla de proyección de las zonas sombreadas y claras, el sensor óptico y el computador.

3.1.1 Etapa 1

La fuente de alimentación DC y la resistencia de carga ($10,6\Omega$) proporcionan al led un voltaje de 2,2 voltios constantes y una corriente de 200mA aproximadamente, lo cual permite garantizar más de 50.000 horas de funcionamiento al led (para una mayor información del lector refiérase a la hoja de especificaciones del led Golden Dragon LYW5SM utilizado), proporcionando así, una intensidad constante al prisma y por consiguiente a la muestra.

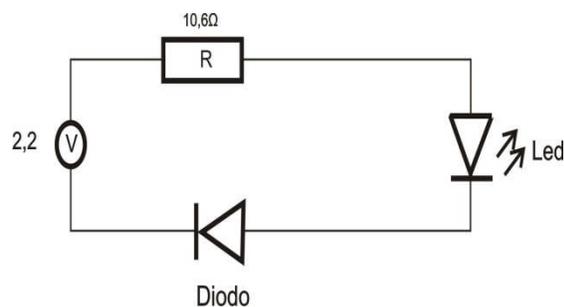


Figura 17. Esquema del circuito de alimentación del led.

La intensidad del diodo led (tabla 3) permite diferenciar claramente la zona sombreada de la clara, es decir, la línea límite que se menciona en los capítulos

anteriores, siendo así fundamental para la medición de la concentración de sacarosa.

3.1.2 Etapa 2

En la integración de los tres componentes que conforman esta etapa (led, prisma y porta muestra) se adecuó una pieza metálica y plástica (figura 18) que permite la disposición que se describe a continuación.

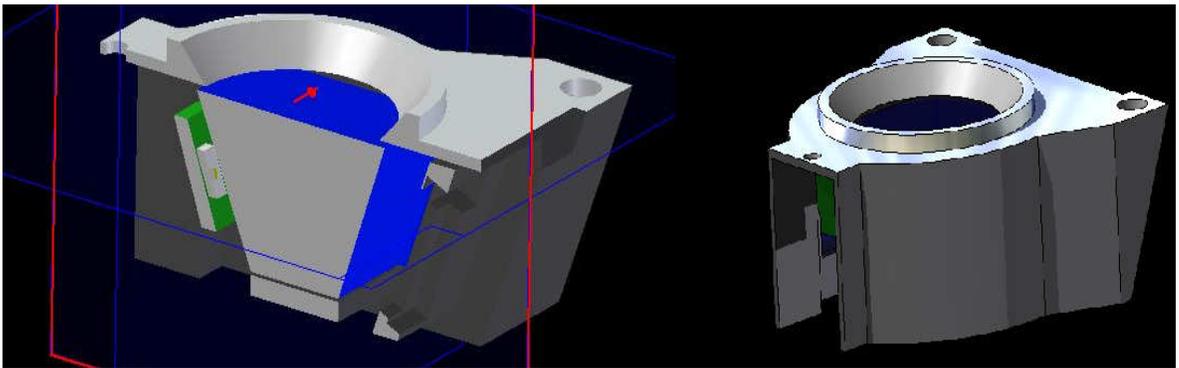


Figura 18. Izquierda. Vista lateral de la pieza plástica y metálica. Esta pieza fue extraída de un refractómetro y modificada para las necesidades del sistema óptico implementado.

El led del tamaño especificado en la tabla 4, se ubico sobre una placa de circuito de dimensiones 14.5mm, 10mm, 1.5mm (placa verde en la figura 18), largo, alto y espesor respectivamente, que a su vez se situó en la pieza plástica y metálica de tal forma que el led quedara paralelo a una de las caras del prisma. Esta disposición del led permite que los haces de luz que se propagan por el prisma lleguen a la muestra con diferentes ángulos de incidencia, permitiendo analizar bajas y altas concentraciones de sacarosa. Las diferentes incidencias de los haces

se deben a que el ángulo de visión o de emisión del led es de 120°, abarcando así, una región grande de iluminación.

Con el ángulo de visión del led utilizado, se garantiza que se puedan analizar muestras con diferentes concentraciones, esto se corroboró experimentalmente observando el comportamiento de la línea límite hasta de concentraciones de 84%Brix; los led con ángulos de visión inferior no se apreció la línea límite, esto se debió a que los ángulos de incidencia son muy limitados y sólo abarcaron un rango bajo de concentraciones.

Continuando con la descripción de esta etapa, el prisma (color azul en la figura 18) se ubico dentro de la pieza plástica y metálica, de tal forma que la base quede orientada hacia arriba para poder hacer contacto con la muestra a analizar.

La parte metálica que hace contacto con la base del prisma y donde se coloca la muestra (aproximadamente muestras entre 1 ml y 1,5 ml) es separada por un o-ring cuya función es evitar que la muestra se filtre por la superficie del prisma, evitando así malas mediciones.

3.1.3 Etapa 3

Los rayos provenientes de la reflexión total interna producidos en la interfaz del prisma y la muestra atraviesan la cara posterior del prisma llegando a la pantalla de proyección M (ver figura 16), ésta a su vez se colocada paralela al prisma, y en ella se observa la zona sombreada y la zona clara bien definidas.

La imagen formada es adquirida por medio de la cámara web y llevada al computador donde el software desarrollado se encarga de detectar la línea y arrojar el %Brix que contiene la muestra. La figura 19 muestra dos imágenes adquiridas con el sistema implementado, se aprecia claramente en cada una de ellas las zonas claras y sombreadas producidas por diferentes concentraciones.

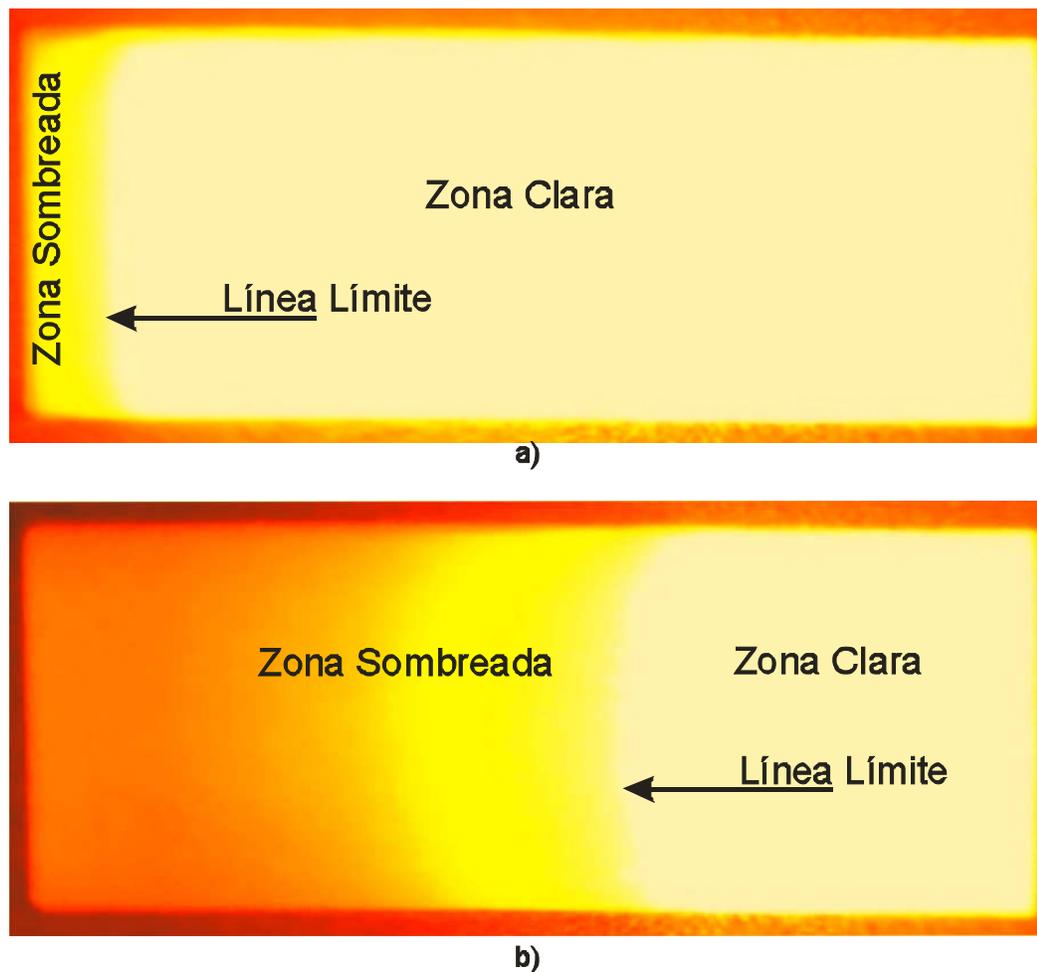


Figura 19. Imágenes de la zona sombreada y la clara, tomadas con sistema óptico utilizado. a) Bajas concentraciones (2,9%Brix). b) Altas concentraciones (52,8%Brix). Mediciones obtenidas con el sistema desarrollado.

En general, el sistema se implementó sobre el banco de pruebas del laboratorio de investigación del Grupo de Óptica y Láser (GOL) de la Universidad del Cauca como se aprecia en la figura 20. En él, todos los componentes fueron fijados adecuadamente para evitar errores en la medida final, producto de vibraciones de las piezas que lo conforman.

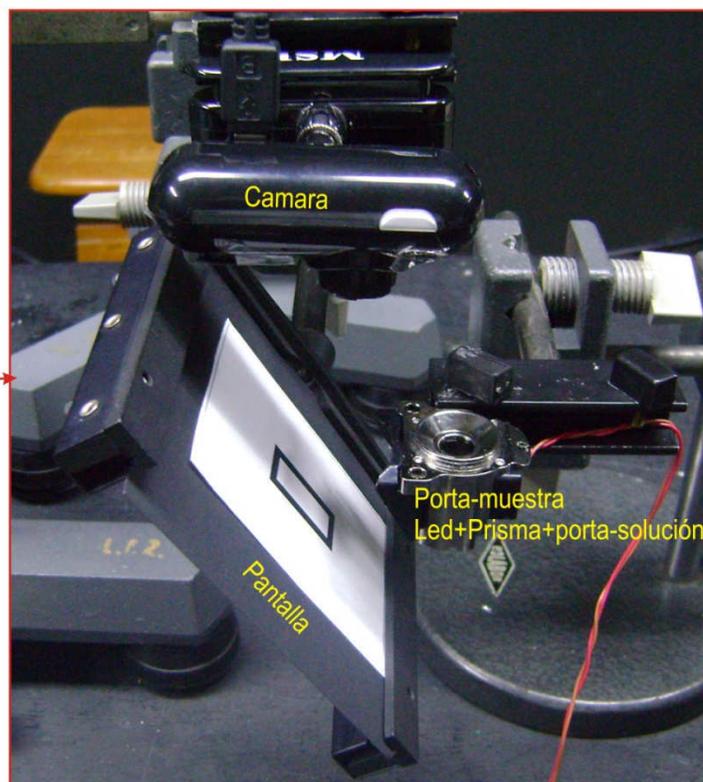
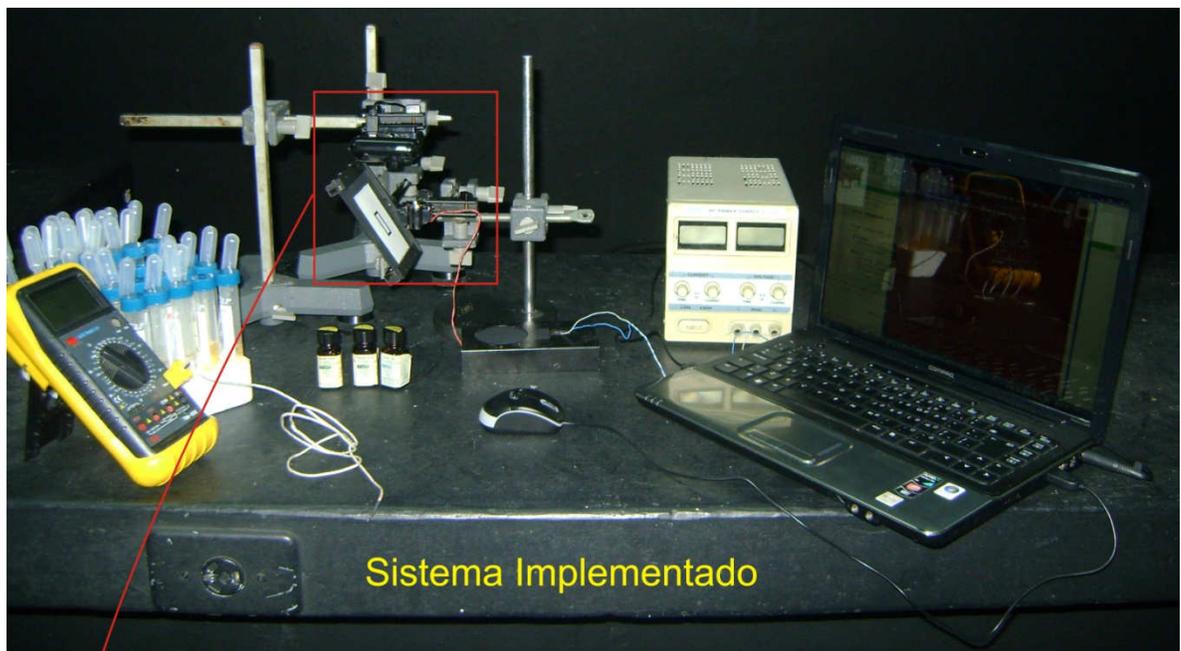


Figura 20. Imagen superior: sistema implementado. Imagen Inferior: componentes ópticos. Laboratorio de investigación del Grupo de Óptica y Laser, Universidad del Cauca.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA (SOFTWARE)

En la medición de la línea límite o ángulo crítico se desarrollo un software basado en el procesamiento digital de imágenes [16,17] que consiste en la transformación por medio de una computadora de la información contenida dentro de las imágenes, utilizando diversas técnicas con el propósito de corregirlas, perfeccionarlas, extraer sus características y/o analizarlas. El software comprende diferentes etapas donde se encuentran diferentes fases tales como el pre-procesamiento, procesamiento, análisis y la calibración como se observa en la figura 21.

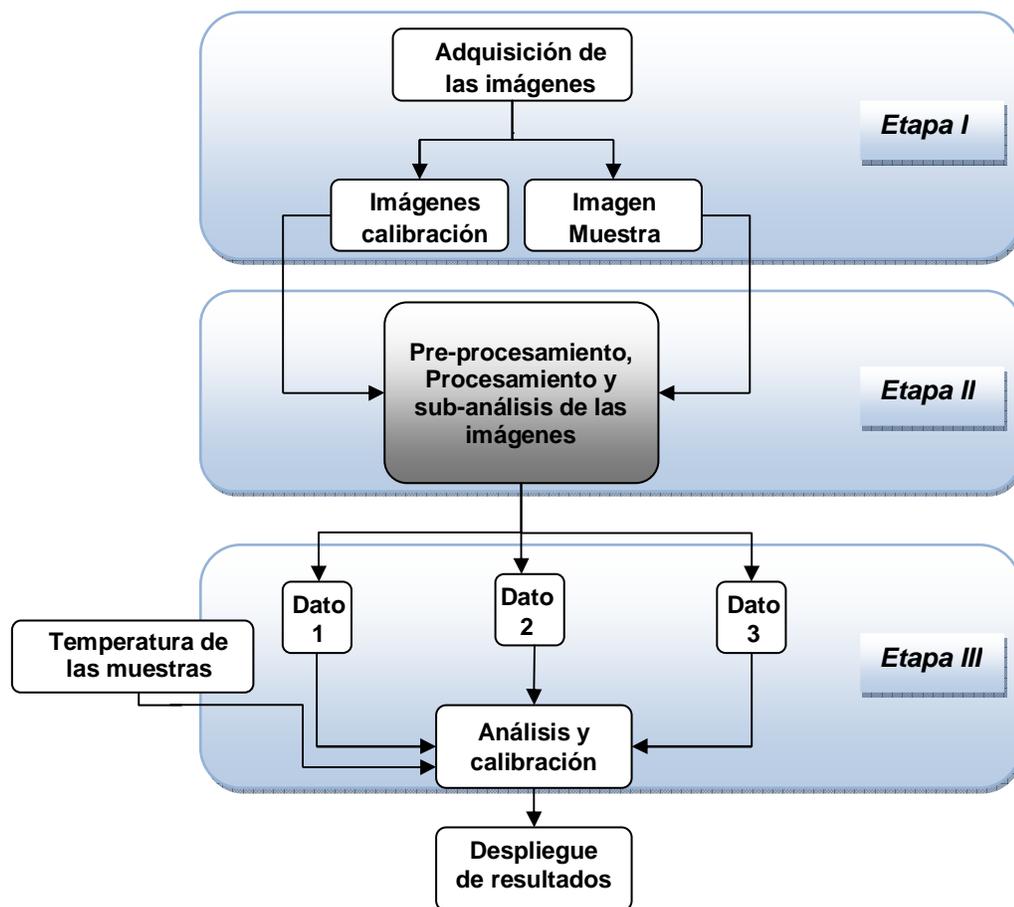


Figura 21. Etapas del software desarrollado.

La primera etapa lo conforma todo lo referente a la captura de la escena a analizar, por ejemplo, dispositivo utilizado para la adquisición (sección 2.4.3), formato de la imagen, resolución del dispositivo, iluminación, entre otros. En general, si existe una correcta adquisición de una imagen, es decir, la mayor cantidad de información contenida en ésta, evitando a toda costa las pérdidas de información, los resultados finales pueden ser satisfactorios.

En la segunda etapa se encuentra el Pre-procesamiento de la imagen, en ella, se busca mejorar la apariencia de la imagen original, es decir, resaltar determinadas características de la imagen o eliminar aquello que las oculta [15] por medio de diferentes técnicas, por ejemplo, transformaciones de color, correcciones de las distorsiones de la imagen y filtrado.

También la segmentación y la extracción de características hacen parte de ella, la primera parte busca aislar la región de interés, obteniéndose como resultado una imagen binaria, para ello, existen un sin número de técnicas de cuales algunas son catalogadas como sencillas y otras un poco más complejas que utilizan algoritmos basados en redes neuronales, fuzzy e inteligencia artificial.

La segunda parte que conforma esta etapa, obtiene las características más relevantes de la imagen a partir de un análisis exhaustivo realizado por el programador, entre ellas se destaca la detección de bordes y la detección de líneas.

En la etapa III, el análisis de la imagen corresponde en relacionar las características encontradas en la etapa anterior con la medición de la variable o parámetro físico a medir.

Las etapas anteriores se culminan finalmente realizando el despliegue en pantalla de los resultados obtenidos.

3.2.1 Adquisición de las imágenes (Etapa I)

Para mediciones confiables de la concentración de sacarosa es necesario calibrar el sistema y para ello se utilizan dos muestras, las cuales son líquidos con concentraciones conocidas de 0%Brix y 84%Brix, es decir, corresponden a sustancias con índices de refracción bajo y alto respectivamente, que a su vez establecen el rango de operación del sistema. Las dos imágenes obtenidas junto con la imagen de la muestra desconocida son llevadas a la siguiente etapa donde se extraen las principales características y se realiza un sub-análisis a cada una de ellas.

3.2.2 Pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes (Etapa II)

En esta etapa se da explicación del proceso que se le realiza a cada imagen (imágenes para la calibración y para la muestra a analizar), que inicia desde el pre-procesamiento hasta el sub-análisis. En la figura 22 se ha desglosado esta etapa para un mejor entendimiento del lector.

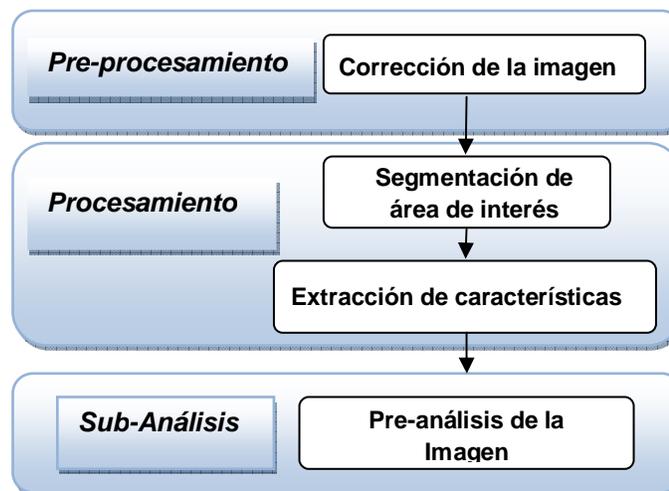


Figura 22. Etapa II del software.

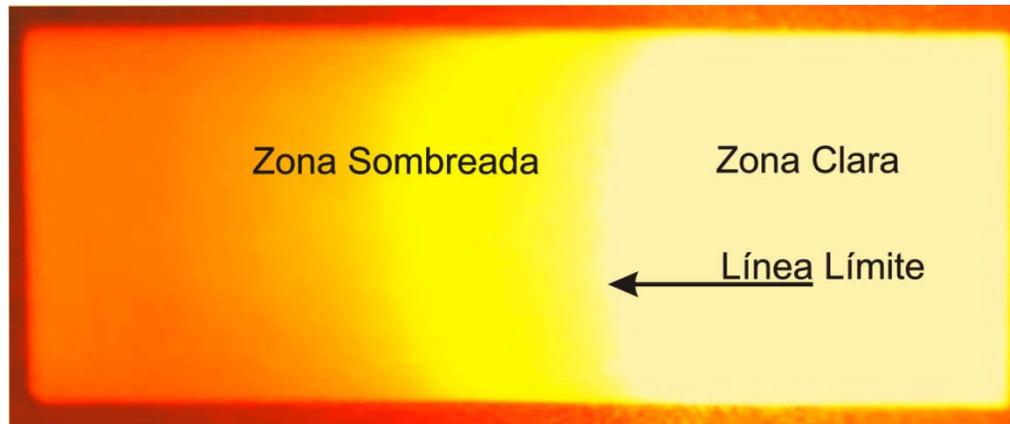
3.2.2.1 Corrección de la imagen

Las cámaras digitales debido a sus componentes ópticos y electrónicos frecuentemente presentan diferentes distorsiones, como lo son, la *distorsión radial* que causa un desplazamiento de los puntos de la imagen hacia dentro o hacia fuera a lo largo del radio, esta se causa principalmente por defectos en el radio de curvatura de la lente de la cámara; la *distorsión descentral* que es provocada por la falta de colinealidad de los centros ópticos y producen en la imagen desplazamientos radiales y tangenciales; la *distorsión prismática* que se origina por las imperfecciones de las lentes durante su diseño y fabricación, así como el montaje de la óptica de la cámara, causando efectos como los anteriormente nombrados sobre la imagen [18].

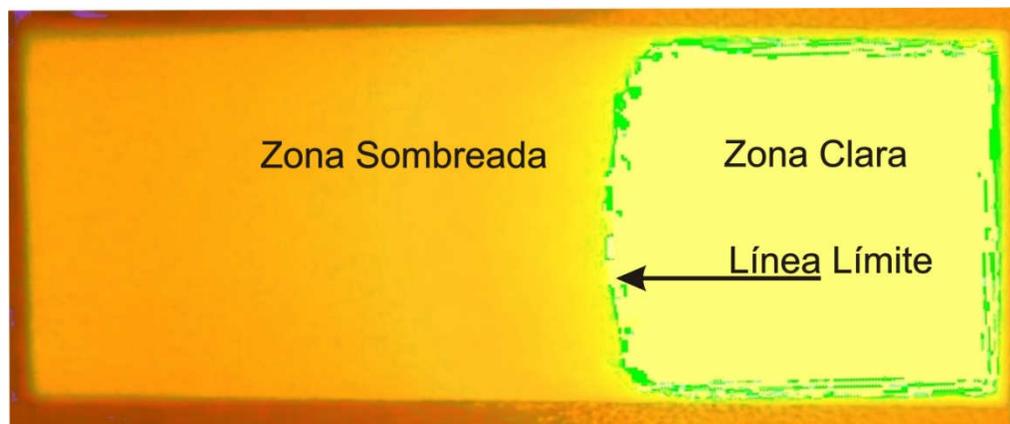
En todas las mediciones geométricas que se deseen realizar sobre imágenes es necesario corregir las distorsiones anteriormente nombradas para así evitar errores en la medición producto de ellas. Para tal fin se implemento un algoritmo de calibración de cámara y rectificación de la imagen basado en el método de Zhang [19] y desarrollado en la librería *OpenCV* por Intel [20,21].

A partir de la rectificación de las imágenes y de la revisión de la literatura acerca de los espacios de color que presenta una imagen, se utilizo el espacio HLS (Hue Lightness Saturation), el cual, permitió una mejor visualización de la región de interés para su posterior detección y análisis.

La figura 23 muestra los espacios de color RGB y HLS para una sola imagen, donde se aprecia que en el espacio HLS la zona clara se encuentra más definida que en el espacio RGB, permitiendo así, mejores herramientas para el análisis de las imágenes que se llevaran a cabo en etapas como segmentación y detección de bordes.



a)



b)

Figura 23. Espacios de Color. a) Espacio de color RGB, b) Espacio de color HLS. Imágenes libres de distorsiones y aplicación de perspectiva.

3.2.2.2 Segmentación y extracción de características

La segmentación de imágenes es el puente entre el bajo nivel de visión del procesamiento de imágenes y el alto nivel de visión. Su objetivo es la partición de una determinada imagen en una colección de "objetos", construidos para que otras

tareas de alto nivel tales como la detección de objetos, el reconocimiento, el rastreo puedan ser realizadas [22].

Existen diversas técnicas para la segmentación de imágenes, de las cuales, se utilizó la segmentación por umbralización de niveles de gris conocida como Threshold, debido a su rapidez, fácil implementación y a que la imagen en el espacio de color utilizado (HLS) presenta en sus canales un gran contraste para la identificación de la línea límite que divide la zona clara de la sombreada.

Posterior a la segmentación se detectó la línea límite utilizando tareas de alto nivel de procesamiento de imágenes, como la detección de bordes, de líneas, y de posición. La detección de bordes se realizó por medio del detector Canny [23] que utiliza los puntos de la imagen donde se presentan cambios o variación de la intensidad para identificar su pertenencia a un objeto o al fondo de la imagen y para las líneas verticales se utilizó la máscara de la figura 24.

-1	2	-1
-1	2	-1
-1	2	-1

Figura 24. Mascara de 3x3, utilizada para la detección de las líneas en sentido Norte-Sur.

El resultado de la combinación de las etapas hasta ahora nombradas es la detección del borde que separa las dos zonas (clara y sombreada) en cada imagen como se aprecia en la figura 25, la cual es la base para la medición del %Brix de las muestras a analizar.

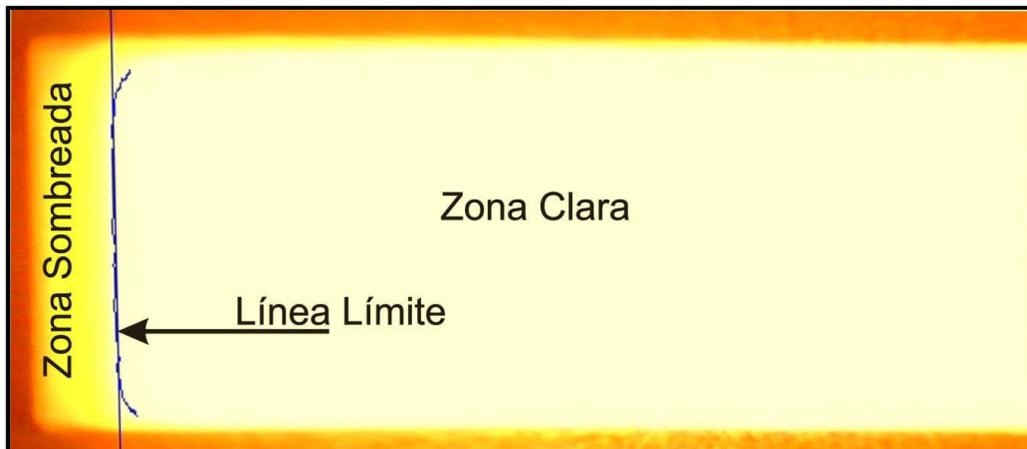


Figura 25. Detección de la línea límite utilizando el Pre-procesamiento y Procesamiento descrito.

3.2.2.3 Pre-análisis de la imagen

Una vez encontrado el borde que delimita las dos zonas, se procedió a trazar la recta llamada "línea límite" que mejor se aproxime o de mejor ajuste a los datos que conforman el borde utilizando el método de mínimos cuadrados.

Posteriormente, para cada imagen se establece la posición de la línea en el plano imagen, valores que se utilizarán para determinar la concentración de la sustancia desconocida, la calibración y el rango de funcionamiento del sistema.

3.2.3 Análisis y calibración (Etapa III)

En la calibración y en la determinación del rango de funcionamiento del sistema, se utilizaron dos sustancias con concentraciones diferentes, una con índice de refracción alto y la otra con una bajo índice de refracción tal como se había nombrado anteriormente. Los datos uno y dos de la figura 21 corresponden a la posición de la línea límite entre la zona sombreada y la clara de las dos

sustancias; el software desarrollado internamente calcula el ángulo crítico que corresponde a cada sustancia a partir de la ecuación (8), (puesto que se conoce el índice de refracción del prisma y de las dos concentraciones) y a su vez, lo adjudica a cada posición encontrada (al dato uno y al dato dos respectivamente).

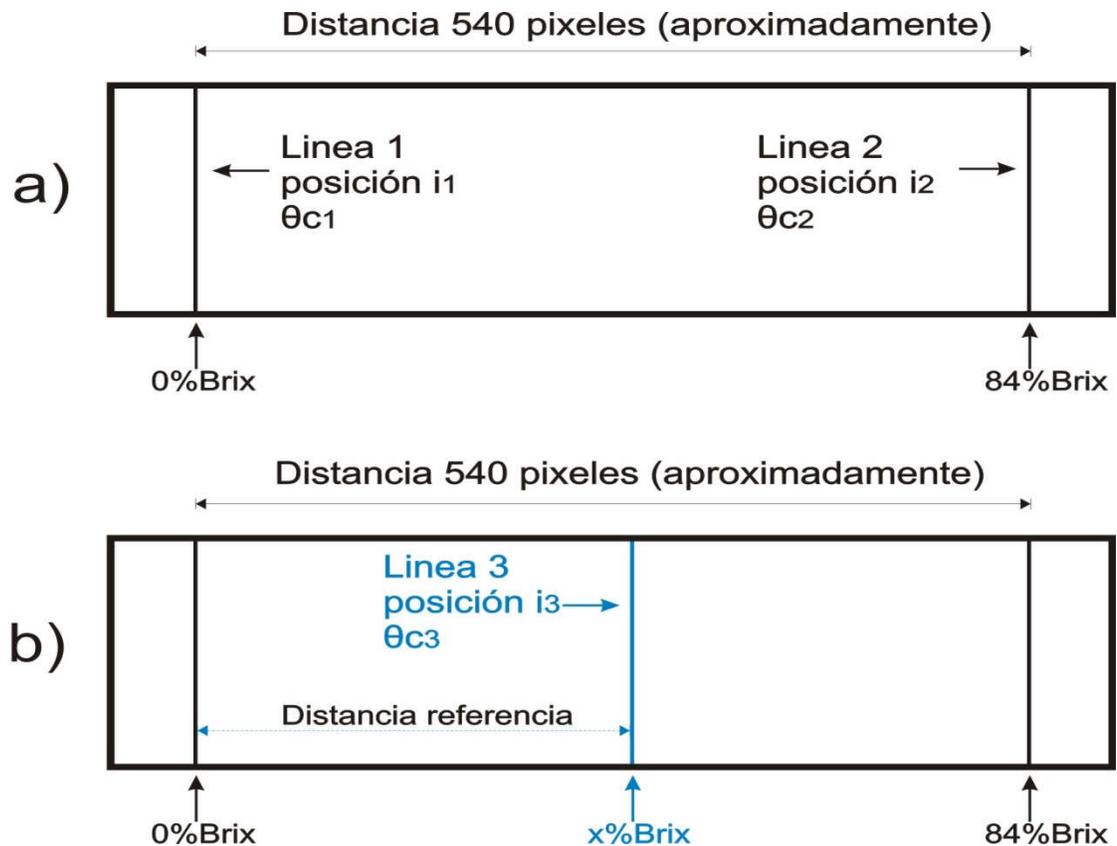


Figura 26. Rango de funcionamiento del sistema. a) Representación de las posiciones de las líneas encontradas, b) Representación de la posición de la línea para una concentración x desconocida.

La distancia en píxeles entre las dos posiciones encontradas se usa para establecer el rango de funcionamiento del equipo y mediante curvas internas realizadas a partir de los datos del anexo I se hace la calibración del sistema. De

esta forma, a cada pixel de la distancia le corresponde un ángulo crítico que se utiliza para calcular el índice de refracción o la concentración de cualquier solución azucarada. Teniendo en cuenta lo anterior, el rango de funcionamiento se estableció entre 0%Brix a 84%Brix o en índice de refracción (n_D^{20}) de 1,3330 a 1,5010. En la figura 26a) se aprecia una representación de la distancia entre las posiciones de las líneas encontradas y el rango de funcionamiento del sistema desarrollado.

Una vez establecido el rango y la calibración se utiliza el dato tres que contiene la posición de línea límite que cuya concentración se desconoce; el software mide la distancia de referencia de la figura 26b) la cual se utiliza para establecer el índice de refracción desconocido y por ende su concentración. Además, ya que la concentración depende de la temperatura el software pide al usuario introducir el valor de la temperatura de la muestra al tomar la imagen, para desplegar en pantalla el valor corregido de la concentración.

En general, el sistema óptico implementado utiliza dos sustancias (con índices de refracción conocidos) que establecen el rango de funcionamiento y la calibración para medir concentraciones de sacarosa desconocidas.

3.3 USO DEL SISTEMA ÓPTICO

Para el uso apropiado del sistema es recomendable los siguientes pasos:

- Conectar la fuente de voltaje a la red eléctrica (110v, 60Hz).
- Limpiar el porta muestra con alcohol o agua destilada y papel optico.
- Depositar la sustancia en el porta muestra hasta recubrirlo completamente (aproximadamente de 1 a 1,5ml).Tomar la imagen correspondiente con la cámara web.

- Limpiar bien (sin dejar residuos) después de cada toma la superficie del prisma con agua destilada o alcohol para una nueva muestra.

Nota: para la calibración es necesario hacer el proceso anterior con las dos sustancias conocidas.

- Ingresar las imágenes correspondientes a la calibración y a la muestra a analizar en el software, junto con la temperatura de toma.
- Desplegar resultados.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

Las pruebas realizadas en el sistema óptico implementado para la medición de la concentración de sacarosa en agua fueron las siguientes:

4.1 VERIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS

Para verificar la calidad de las mediciones realizadas con el sistema implementado se analizaron tres muestras (figura 27) con índices de refracción certificados, los cuales fueron donados por Fernando Correa Jefe de Metrología del Ingenio la Cabaña S.A al proyecto.



Figura 27. Líquidos certificados para calibración de refractómetros.

En tabla 8 se describen los parámetros de cada muestra, y los resultados de la medición con el sistema óptico desarrollado se presentan en la tabla 9. Para el cálculo de índice de refracción a una temperatura de 20°C se utilizó la fórmula:

$$\eta^{20} = \eta_{PATRÓN}^{25} + (CT \times \Delta T) \quad (13)$$

Donde CT es el coeficiente de temperatura, y ΔT es la diferencia de las temperaturas entre la muestra y el valor al cual se quiere convertir.

Tabla 8. Características de tres muestras certificadas.

Descripción	Índice de refracción a 25°C (η_D^{25})	Índice de refracción a 20°C (η_D^{20})	Equivalencia en %Brix a 20°C.
Solución 1	1,350 ± 0,0002	1,3517 ± 0,0002	12,4 ± 0,2
Solución 2	1,370 ± 0,0002	1,3717 ± 0,0002	24,6 ± 0,1
Solución 3	1,420 ± 0,0002	1,4219 ± 0,0002	50,9 ± 0,1

De las tablas 8 y 9 se analiza que los resultados obtenidos con el refractómetro desarrollado o sistema óptico implementado fueron exitosos, ya que los valores medidos están dentro del rango de las muestras certificadas.

Tabla 9. Resultados obtenidos con el sistema óptico implementado.

Descripción	Número de muestras	Índice de refracción (η_D)	Temperatura de medición (°C)	%Brix con TC*
Solución 1	8	1,3507	25	12,2
Solución 2	8	1,3711	25	24,7
Solución 3	8	1,4212	25	51,0

* TC: compensación de temperatura a 20°C.

Además, ya que los índices de refracción de las muestras son certificados y a partir de los resultados obtenidos, se deriva la exactitud del sistema que es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud dada [24]; se estableció una exactitud de $\pm 0,24\%$ sobre la escala de medida, es decir, todas las medidas presentan una inexactitud de $\pm 0,2\%$ Brix sobre todo el rango de medición.

La diferencia que presentan los resultados obtenidos (tabla 9) con el valor verdadero de la muestra patrón, se deben a los errores que pueden ocurrir al segmentar la imagen, ya que de esta segmentación depende la posición de la línea que divide las zonas que se presentan, y un error en ella, se ve reflejado en el resultado notoriamente.

4.2 OTRAS MEDICIONES Y COMPARACIÓN CON EL REFRACTÓMETRO REICHERT ABBE MARK II

Con el objetivo de analizar y de comparar las mediciones realizadas con el sistema óptico, se prepararon 21 muestras con concentraciones de sacarosa, que varían desde 2%Brix hasta 53%Brix. Para la preparación de cada muestra se realizó el procedimiento que se utiliza en el Ingenio La cabaña S.A descrito a continuación:

Por ejemplo, preparación de una solución a 20%Brix.

- Pesar sobre un platillo destarado aproximadamente 22g de sacarosa.
- Colocar el platillo con la muestra de sacarosa en el desecador por 10 minutos aproximadamente a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Transcurrido ese tiempo, enfriar el platillo con la muestra ± 10 minutos.
- En un Beaker de vidrio destarado pesar $20\text{g} \pm 0,1\text{g}$ de la sacarosa. Completar a $100\text{g} \pm 0,1\text{g}$ exactos con agua destilada.
- Agitar la muestra hasta disolver la sacarosa.
- Y por último, poner a enfriar la muestra al ambiente.

Una vez realizados los pasos anteriores se procede a utilizar la solución para las diferentes mediciones. Para soluciones con otras concentraciones se realizan los pasos anteriormente descritos.

Los resultados obtenidos con el sistema se describen en la tabla 10, ahí se observa las diferentes concentraciones preparadas, el numero de análisis por cada muestra, la media de los datos y su correspondiente desviación estándar.

Tabla 10. Resultados utilizando el sistema óptico para diversas concentraciones.

Concentración (%Brix)	Numero de muestras	%Brix con TC	Desviación estándar (σ)
2	7	1,8	0,1
3	7	2,7	0,1
5	7	5,2	0,1
7	7	6,8	0,1
8	7	8,1	0,2
10,5	7	10,4	0,0
12,5	7	12,3	0,1
14,5	7	14,6	0,1
16,5	7	16,7	0
18,5	7	18,4	0,1
20	7	20,1	0,1
23	7	23,1	0,1
27	7	26,8	0
28	7	28,1	0,1
30	7	29,9	0
32	7	32,2	0,2
35	7	35,1	0

Continuación tabla 10.

Concentración (%Brix)	Numero de muestras	%Brix con TC	Desviación estándar (σ)
37	7	37,2	0
39	7	39,3	0,2
51	7	51,2	0,3
53	7	53,2	0,2

A partir de los resultados se observa que las mediciones del instrumento se encuentran muy cercanas a la composición de las muestras, y la máxima desviación estándar fue de 0.3, lo cual significa que el sistema óptico presenta un grado bajo de dispersión en sus resultados. Es de recordar, que los valores de %Brix presentan una inexactitud de $\pm 0,2\%$ Brix.

Para corroborar los resultados anteriores, se analizaron las muestras en el refractómetro Reichert Abbe Mark II que pertenece a la Unidad de Análisis Industrial adscrita a la Universidad del Cauca y coordinada por el Magister Fernando Hernández.

Tabla 11. Resultados con el refractómetro Reichert Abbe Mark II de la Unidad de Análisis Industrial de la Universidad del Cauca.

Concentración (%Brix)	Numero de muestras	%Brix	Desviación estándar (σ)
2	5	1,9	0,05
3	5	3,0	0,1
5	5	5,1	0,05
7	5	7,1	0,1

Continuación tabla 11.

Concentración (%Brix)	Numero de muestras	%Brix	Desviación estándar (σ)
8	5	8,1	0,05
10,5	5	10,6	0,04
12,5	5	12,5	0,05
14,5	5	14,6	0,05
16,5	5	16,5	0,1
18,5	5	18,5	0,05
20	5	20,0	0,05
23	5	23,1	0,1
27	5	27,0	0,05
28	5	28,1	0,05
30	5	30,0	0,08
32	5	32,1	0,05
35	5	35,2	0,05
37	5	37,1	0,05
39	5	39,2	0
51	5	51,4	0,1
53	5	53,2	0,05

El refractómetro de medición Mark II tiene una exactitud de $\pm 0,1\%$ Brix en toda la escala y los valores de %Brix presentan compensación de temperatura. De la tabla anterior se observa, que el quipo presento en sus medidas una desviación estándar de 0.1, lo cual infiere la precisión que tienen las medidas.

De las tablas 10 y 11, y de la figura 28 se puede analizar, que los resultados obtenidos con el sistema óptico y con el refractómetro presentan muy baja

dispersión entre ellos, es decir, los valores para cada sustancia o concentración son muy similares, donde la máxima desviación fue del orden de 0,3%Brix entre los dos instrumentos.

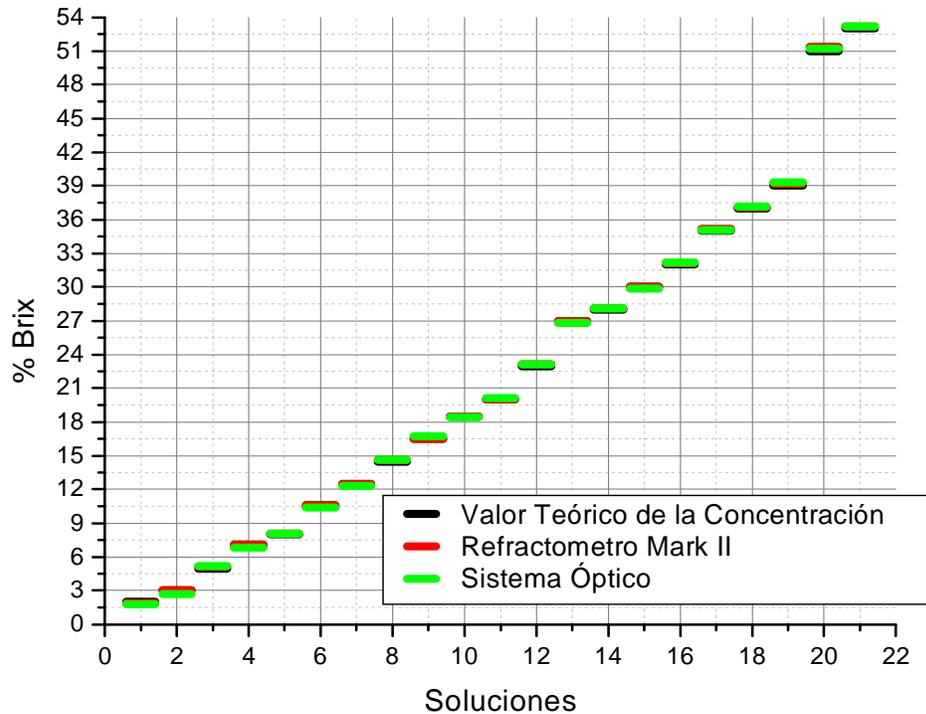


Figura 28. Grafica de los resultados obtenidos con el sistema óptico y el refractómetro.

La desviación en los datos (figura 28) se puede atribuir a varios factores entre ellos a errores aleatorios, por ejemplo, errores en las mediciones al preparar las muestras, la mala apreciación de la imagen en el Mark II producto de la fatiga del operador al manipular el instrumento; y a errores sistemáticos, como los errores del software desarrollado al medir la línea de separación de las zonas, la

eliminación de información importante al segmentar las imágenes, el desajuste al calibrar el refractómetro, etc.

El error porcentual máximo que se presenta entre los datos obtenidos con el sistema óptico y el refractómetro fue del 10% presentándose en la solución 2, este error se pudo causar por la contaminación de la muestra al limpiar el sistema óptico implementado.

5. CONCLUSIONES

El método del Ángulo Crítico y las técnicas de procesamiento óptico y digital de imágenes desarrollados e implementados en este trabajo permitieron medir la cantidad de sólidos solubles en un líquido, es decir, se midió la concentración de sacarosa disuelta en agua con gran precisión.

Una variante planteada en este trabajo a los refractómetros digitales existentes hoy en día en el mercado, es la utilización de una cámara web como sensor óptico y la implementación de un algoritmo basado en el procesamiento de imágenes para la medición del índice de refracción y por consiguiente la concentración de una sustancia.

La utilización de elementos de bajo costo en la implementación del sistema óptico, busca crear una alternativa diferente a los refractómetros de alto costo existentes, lo cual, hace que sea una opción para la comunidad científica e industrial en el desarrollo de sus investigaciones o procesos.

Para realizar la equivalencia entre el índice de refracción y la concentración de azúcar disuelta en agua establecida por el Comité Internacional de Métodos Unificados de Análisis Azucareros (ICUMSA), se diseñó el sistema óptico con compensación de temperatura y longitud de onda de la fuente de 589nm.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Dada la importancia de los resultados obtenidos, es importante continuar con la investigación en esta área, como la adecuación del sistema desarrollado para llevarlo a ambientes industriales y poder culminar en la construcción de dispositivos que permitan medir %Brix en cualquier parte de un proceso industrializado.
- Para estudiantes y profesores que deseen realizar prácticas con el dispositivo, se recomienda realizar los pasos descritos en la sección 3.4, ya que es fundamental para obtener una buena medida de la concentración.
- En trabajos de investigación que permitan analizar el desempeño del sistema óptico en la caracterización de jugos, meladuras, mermeladas, salsas, y entre otras aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] BASS M, Handbook of Optics, Volume I, Second Edition, Fundamentals, Techniques, and Design, McGRAW-HILL, 1995, Section 1.3.
- [2] PEDROTTI F. L, PEDROTTI L. S, Introduction to optics, Second Edition, Prentice-Hall 1993, p. 571-575.
- [3] GUENTHER R. D, Modern Optics, ISBN 0471605380, Wiley, 1990, Chapter 7.
- [4] BORN M, WOLF E, Principles to Optics, ISBN 0521642221, Seven Edition, CUP 2005, p 91-96.
- [5] PASTO D.J, JHONSON C.R, Determinación de Estructuras Orgánicas, Reverté S.A, p 73-77.
- [6] HORWARD A. STROBEL, Instrumentación Química: estudio sistemático del análisis instrumental, Limusa 1979.
- [7] MENN N, Practical Optics, ISBN 200124909515, Elsevier 2004, p 45.
- [8] OLSEN E. D, Métodos Ópticos de análisis, Reverté 1986, Capítulo 9.
- [9] HECHT E, Optics, Fourth Edition, Adisson Wesley 2002.[10] Sharma K, Optics Principles and Applications, Elsevier 2006, p 32-33.

- [10] BANERJEE P.P, POON T, principles of applied optics, ISBN 0256088608, Irwin, 1991.
- [11] WEBSTER J.G, Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Refractive Index Measurement, 1999.
- [12] MAIER, H.G, Métodos modernos de análisis de alimentos: Métodos ópticos, España, 1981.
- [13] Instrument Engineers' Handbook, Process Measurement and Analysis, Fourth Edition, Volume I.[14] Creus S. A, Instrumentación Industrial, Séptima Edición, Alfaomega 2006, p. 313-314.
- [15] HUESO, Arturo de la Escalera. Visión por Computador, fundamentos y métodos. España, 2001.
- [16] BERND J, Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications, Second Edition, CRC, 2004.
- [17] ACHARYA T.,RAY A, Image Processing, Principles and Applications, Wiley 2005.
- [18] IDROBO G, RAMIREZ C, Diseño e Implementación de un sistema de Adquisición de Datos para la Representación Virtual Tridimensional del Rostro Humano (Tri-Ident), Tesis Ingeniería Física, 2005.
- [19] ZHANG, Z, A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000.

[20] Intel® Corporation, Open Source Computer Vision Library, 2001.[21] Gary B, Adrian K, Learning OpenCV, First Edition, O'REILLY, 2008.

[22] CHAN T, SHEN F, Image Processing and Analysis, Sian, 2005.

[23] PRATT W, Digital Image Processing, Fourth Edition, Wiley, 2007

[24] CREUS A, Instrumentación Industrial, Septima Edición, Alfaomega, 2007.

ANEXOS

ANEXO I

Tabla de conversión de índice de refracción a %Brix para soluciones azucaradas desarrollada por ICUMSA.

EQUIVALENCIA DE PORCENTAJE BRIX A ÍNDICE DE REFRACCIÓN									
%Brix	η_D^{20}	%Brix	η_D^{20}	%Brix	η_D^{20}	%Brix	η_D^{20}	%Brix	η_D^{20}
0,0	1,33299	20,0	1,36384	40,0	1,39986	60,0	1,44193	80,0	1,49071
0,1	1,33313	20,1	1,36401	40,1	1,40006	60,1	1,44216	80,1	1,49097
0,2	1,33328	20,2	1,36417	40,2	1,40025	60,2	1,44238	80,2	1,49123
0,3	1,33342	20,3	1,36434	40,3	1,40045	60,3	1,44261	80,3	1,49150
0,4	1,33356	20,4	1,36451	40,4	1,40064	60,4	1,44284	80,4	1,49176
0,5	1,33371	20,5	1,36468	40,5	1,40084	60,5	1,44307	80,5	1,49202
0,6	1,33385	20,6	1,36484	40,6	1,40103	60,6	1,44329	80,6	1,49228
0,7	1,33399	20,7	1,36501	40,7	1,40123	60,7	1,44352	80,7	1,49254
0,8	1,33413	20,8	1,36518	40,8	1,40142	60,8	1,44375	80,8	1,49281
0,9	1,33428	20,9	1,36534	40,9	1,40162	60,9	1,44397	80,9	1,49307
1,0	1,33442	21,0	1,36551	41,0	1,40181	61,0	1,44420	81,0	1,49333
1,1	1,33456	21,1	1,36568	41,1	1,40201	61,1	1,44443	81,1	1,49359
1,2	1,33471	21,2	1,36585	41,2	1,40220	61,2	1,44466	81,2	1,49386
1,3	1,33485	21,3	1,36602	41,3	1,40240	61,3	1,44489	81,3	1,49412
1,4	1,33500	21,4	1,36619	41,4	1,40260	61,4	1,44512	81,4	1,49439
1,5	1,33514	21,5	1,36636	41,5	1,40280	61,5	1,44535	81,5	1,49465

1,6	1,33528	21,6	1,36652	41,6	1,40299	61,6	1,44558	81,6	1,49491
1,7	1,33543	21,7	1,36669	41,7	1,40319	61,7	1,44581	81,7	1,49518
1,8	1,33557	21,8	1,36686	41,8	1,40339	61,8	1,44604	81,8	1,49544
1,9	1,33572	21,9	1,36703	41,9	1,40358	61,9	1,44627	81,9	1,49571
2,0	1,33586	22,0	1,36720	42,0	1,40378	62,0	1,44650	82,0	1,49597
2,1	1,33601	22,1	1,36737	42,1	1,40398	62,1	1,44673	82,1	1,49624
2,2	1,33615	22,2	1,36754	42,2	1,40418	62,2	1,44696	82,2	1,49650
2,3	1,33630	22,3	1,36771	42,3	1,40437	62,3	1,44719	82,3	1,49677
2,4	1,33644	22,4	1,36788	42,4	1,40457	62,4	1,44742	82,4	1,49703
2,5	1,33659	22,5	1,36805	42,5	1,40477	62,5	1,44766	82,5	1,49730
2,6	1,33674	22,6	1,36821	42,6	1,40497	62,6	1,44789	82,6	1,49756
2,7	1,33688	22,7	1,36838	42,7	1,40517	62,7	1,44812	82,7	1,49783
2,8	1,33703	22,8	1,36855	42,8	1,40536	62,8	1,44835	82,8	1,49809
2,9	1,33717	22,9	1,36872	42,9	1,40556	62,9	1,44858	82,9	1,49836
3,0	1,33732	23,0	1,36889	43,0	1,40576	63,0	1,44881	83,0	1,49862
3,1	1,33747	23,1	1,36906	43,1	1,40596	63,1	1,44904	83,1	1,49889
3,2	1,33761	23,2	1,36923	43,2	1,40616	63,2	1,44927	83,2	1,49915
3,3	1,33776	23,3	1,36940	43,3	1,40636	63,3	1,44951	83,3	1,49942
3,4	1,33791	23,4	1,36957	43,4	1,40656	63,4	1,44974	83,4	1,49969
3,5	1,33806	23,5	1,36975	43,5	1,40676	63,5	1,44997	83,5	1,49996
3,6	1,33820	23,6	1,36992	43,6	1,40696	63,6	1,45020	83,6	1,50022
3,7	1,33835	23,7	1,37009	43,7	1,40716	63,7	1,45043	83,7	1,50049
3,8	1,33850	23,8	1,37026	43,8	1,40736	63,8	1,45067	83,8	1,50076
3,9	1,33864	23,9	1,37043	43,9	1,40756	63,9	1,45090	83,9	1,50102
4,0	1,33879	24,0	1,37060	44,0	1,40776	64,0	1,45113	84,0	1,50129
4,1	1,33894	24,1	1,37079	44,1	1,40796	64,1	1,45137	84,1	1,50156
4,2	1,33908	24,2	1,37099	44,2	1,40816	64,2	1,45160	84,2	1,50183
4,3	1,33923	24,3	1,37118	44,3	1,40837	64,3	1,45184	84,3	1,50210
4,4	1,33938	24,4	1,37137	44,4	1,40857	64,4	1,45207	84,4	1,50237

4,5	1,33953	24,5	1,37157	44,5	1,40877	64,5	1,45231	84,5	1,50264
4,6	1,33967	24,6	1,37176	44,6	1,40897	64,6	1,45254	84,6	1,50290
4,7	1,33982	24,7	1,37195	44,7	1,40917	64,7	1,45278	84,7	1,50317
4,8	1,33997	24,8	1,37214	44,8	1,40938	64,8	1,45301	84,8	1,50344
4,9	1,34011	24,9	1,37234	44,9	1,40958	64,9	1,45325	84,9	1,50371
5,0	1,34026	25,0	1,37253	45,0	1,40978	65,0	1,45348	85,0	1,50398
5,1	1,34041	25,1	1,37268	45,1	1,40998	65,1	1,45372	85,1	1,50425
5,2	1,34056	25,2	1,37284	45,2	1,41019	65,2	1,45395	85,2	1,50452
5,3	1,34071	25,3	1,37299	45,3	1,41039	65,3	1,45419	85,3	1,50480
5,4	1,34086	25,4	1,37314	45,4	1,41059	65,4	1,45442	85,4	1,50507
5,5	1,34101	25,5	1,37330	45,5	1,41080	65,5	1,45466	85,5	1,50534
5,6	1,34115	25,6	1,37345	45,6	1,41100	65,6	1,45490	85,6	1,50561
5,7	1,34130	25,7	1,37360	45,7	1,41120	65,7	1,45513	85,7	1,50588
5,8	1,34145	25,8	1,37375	45,8	1,41140	65,8	1,45537	85,8	1,50616
5,9	1,34160	25,9	1,37391	45,9	1,41161	65,9	1,45560	85,9	1,50643
6,0	1,34175	26,0	1,37406	46,0	1,41181	66,0	1,45584	86,0	1,50670
6,1	1,34190	26,1	1,37424	46,1	1,41201	66,1	1,45608	86,1	1,50697
6,2	1,34205	26,2	1,37441	46,2	1,41222	66,2	1,45632	86,2	1,50724
6,3	1,34220	26,3	1,37459	46,3	1,41242	66,3	1,45655	86,3	1,50751
6,4	1,34235	26,4	1,37476	46,4	1,41263	66,4	1,45679	86,4	1,50778
6,5	1,34250	26,5	1,37494	46,5	1,41283	66,5	1,45703	86,5	1,50805
6,6	1,34265	26,6	1,37512	46,6	1,41303	66,6	1,45727	86,6	1,50832
6,7	1,34280	26,7	1,37529	46,7	1,41324	66,7	1,45751	86,7	1,50859
6,8	1,34295	26,8	1,37547	46,8	1,41344	66,8	1,45774	86,8	1,50886
6,9	1,34310	26,9	1,37564	46,9	1,41365	66,9	1,45798	86,9	1,50913
7,0	1,34325	27,0	1,37582	47,0	1,41385	67,0	1,45822	87,0	1,50940
7,1	1,34340	27,1	1,37600	47,1	1,41406	67,1	1,45846	87,1	1,50967
7,2	1,34355	27,2	1,37617	47,2	1,41426	67,2	1,45870	87,2	1,50994
7,3	1,34371	27,3	1,37635	47,3	1,41447	67,3	1,45894	87,3	1,51021

7,4	1,34386	27,4	1,37652	47,4	1,41468	67,4	1,45918	87,4	1,51048
7,5	1,34401	27,5	1,37670	47,5	1,41489	67,5	1,45942	87,5	1,51075
7,6	1,34416	27,6	1,37688	47,6	1,41509	67,6	1,45965	87,6	1,51102
7,7	1,34431	27,7	1,37705	47,7	1,41530	67,7	1,45989	87,7	1,51129
7,8	1,34447	27,8	1,37723	47,8	1,41551	67,8	1,46013	87,8	1,51156
7,9	1,34462	27,9	1,37740	47,9	1,41571	67,9	1,46037	87,9	1,51183
8,0	1,34477	28,0	1,37758	48,0	1,41592	68,0	1,46061	88,0	1,51210
8,1	1,34492	28,1	1,37776	48,1	1,41613	68,1	1,46085	88,1	1,51238
8,2	1,34507	28,2	1,37794	48,2	1,41633	68,2	1,46109	88,2	1,51266
8,3	1,34523	28,3	1,37811	48,3	1,41654	68,3	1,46134	88,3	1,51294
8,4	1,34538	28,4	1,37829	48,4	1,41675	68,4	1,46158	88,4	1,51322
8,5	1,34553	28,5	1,37847	48,5	1,41696	68,5	1,46182	88,5	1,51350
8,6	1,34568	28,6	1,37865	48,6	1,41716	68,6	1,46206	88,6	1,51378
8,7	1,34583	28,7	1,37883	48,7	1,41737	68,7	1,46230	88,7	1,51406
8,8	1,34599	28,8	1,37900	48,8	1,41758	68,8	1,46255	88,8	1,51434
8,9	1,34614	28,9	1,37918	48,9	1,41778	68,9	1,46279	88,9	1,51462
9,0	1,34629	29,0	1,37936	49,0	1,41799	69,0	1,46303	89,0	1,51490
9,1	1,34644	29,1	1,37954	49,1	1,41820	69,1	1,46327	89,1	1,51518
9,2	1,34660	29,2	1,37972	49,2	1,41841	69,2	1,46352	89,2	1,51546
9,3	1,34675	29,3	1,37990	49,3	1,41862	69,3	1,46376	89,3	1,51574
9,4	1,34690	29,4	1,38008	49,4	1,41883	69,4	1,46400	89,4	1,51602
9,5	1,34706	29,5	1,38026	49,5	1,41904	69,5	1,46425	89,5	1,51630
9,6	1,34721	29,6	1,38043	49,6	1,41925	69,6	1,46449	89,6	1,51658
9,7	1,34736	29,7	1,38061	49,7	1,41946	69,7	1,46473	89,7	1,51686
9,8	1,34751	29,8	1,38079	49,8	1,41967	69,8	1,46497	89,8	1,51714
9,9	1,34767	29,9	1,38097	49,9	1,41988	69,9	1,46522	89,9	1,51742
10,0	1,34782	30,0	1,38115	50,0	1,42009	70,0	1,46546	90,0	1,51770
10,1	1,34798	30,1	1,38133	50,1	1,42030	70,1	1,46570		
10,2	1,34813	30,2	1,38151	50,2	1,42051	70,2	1,46595		

10,3	1,34829	30,3	1,38169	50,3	1,42072	70,3	1,46619
10,4	1,34844	30,4	1,38187	50,4	1,42093	70,4	1,46644
10,5	1,34860	30,5	1,38206	50,5	1,42115	70,5	1,46668
10,6	1,34875	30,6	1,38224	50,6	1,42136	70,6	1,46692
10,7	1,34891	30,7	1,38242	50,7	1,42157	70,7	1,46717
10,8	1,34906	30,8	1,38260	50,8	1,42178	70,8	1,46741
10,9	1,34922	30,9	1,38278	50,9	1,42199	70,9	1,46766
11,0	1,34937	31,0	1,38296	51,0	1,42220	71,0	1,46790
11,1	1,34953	31,1	1,38314	51,1	1,42241	71,1	1,46815
11,2	1,34968	31,2	1,38332	51,2	1,42262	71,2	1,46839
11,3	1,34984	31,3	1,38351	51,3	1,42284	71,3	1,46864
11,4	1,34999	31,4	1,38369	51,4	1,42305	71,4	1,46889
11,5	1,35015	31,5	1,38387	51,5	1,42326	71,5	1,46914
11,6	1,35031	31,6	1,38405	51,6	1,42347	71,6	1,46938
11,7	1,35046	31,7	1,38423	51,7	1,42368	71,7	1,46963
11,8	1,35062	31,8	1,38442	51,8	1,42390	71,8	1,46988
11,9	1,35077	31,9	1,38460	51,9	1,42411	71,9	1,47012
12,0	1,35093	32,0	1,38478	52,0	1,42432	72,0	1,47037
12,1	1,35109	32,1	1,38496	52,1	1,42454	72,1	1,47062
12,2	1,35124	32,2	1,38515	52,2	1,42475	72,2	1,47087
12,3	1,35140	32,3	1,38533	52,3	1,42497	72,3	1,47111
12,4	1,35156	32,4	1,38551	52,4	1,42518	72,4	1,47136
12,5	1,35172	32,5	1,38570	52,5	1,42540	72,5	1,47161
12,6	1,35187	32,6	1,38588	52,6	1,42561	72,6	1,47186
12,7	1,35203	32,7	1,38606	52,7	1,42583	72,7	1,47211
12,8	1,35219	32,8	1,38624	52,8	1,42604	72,8	1,47235
12,9	1,35234	32,9	1,38643	52,9	1,42626	72,9	1,47260
13,0	1,35250	33,0	1,38661	53,0	1,42647	73,0	1,47285
13,1	1,35266	33,1	1,38680	53,1	1,42669	73,1	1,47310

13,2	1,35282	33,2	1,38698	53,2	1,42690	73,2	1,47335
13,3	1,35297	33,3	1,38717	53,3	1,42712	73,3	1,47360
13,4	1,35313	33,4	1,38735	53,4	1,42733	73,4	1,47385
13,5	1,35329	33,5	1,38754	53,5	1,42755	73,5	1,47410
13,6	1,35345	33,6	1,38772	53,6	1,42777	73,6	1,47435
13,7	1,35361	33,7	1,38791	53,7	1,42798	73,7	1,47460
13,8	1,35376	33,8	1,38809	53,8	1,42820	73,8	1,47485
13,9	1,35392	33,9	1,38828	53,9	1,42841	73,9	1,47510
14,0	1,35408	34,0	1,38846	54,0	1,42863	74,0	1,47535
14,1	1,35424	34,1	1,38865	54,1	1,42885	74,1	1,47560
14,2	1,35440	34,2	1,38883	54,2	1,42906	74,2	1,47585
14,3	1,35456	34,3	1,38902	54,3	1,42928	74,3	1,47611
14,4	1,35472	34,4	1,38920	54,4	1,42950	74,4	1,47636
14,5	1,35488	34,5	1,38939	54,5	1,42972	74,5	1,47661
14,6	1,35504	34,6	1,38958	54,6	1,42993	74,6	1,47686
14,7	1,35520	34,7	1,38976	54,7	1,43015	74,7	1,47711
14,8	1,35536	34,8	1,38995	54,8	1,43037	74,8	1,47737
14,9	1,35552	34,9	1,39013	54,9	1,43058	74,9	1,47762
15,0	1,35568	35,0	1,39032	55,0	1,43080	75,0	1,47787
15,1	1,35584	35,1	1,39051	55,1	1,43102	75,1	1,47812
15,2	1,35600	35,2	1,39070	55,2	1,43124	75,2	1,47838
15,3	1,35616	35,3	1,39088	55,3	1,43146	75,3	1,47863
15,4	1,35632	35,4	1,39107	55,4	1,43168	75,4	1,47888
15,5	1,35649	35,5	1,39126	55,5	1,43190	75,5	1,47914
15,6	1,35665	35,6	1,39145	55,6	1,43211	75,6	1,47939
15,7	1,35681	35,7	1,39164	55,7	1,43233	75,7	1,47964
15,8	1,35697	35,8	1,39182	55,8	1,43255	75,8	1,47989
15,9	1,35713	35,9	1,39201	55,9	1,43277	75,9	1,48015
16,0	1,35729	36,0	1,39220	56,0	1,43299	76,0	1,48040

16,1	1,35745	36,1	1,39239	56,1	1,43321	76,1	1,48066
16,2	1,35761	36,2	1,39258	56,2	1,43343	76,2	1,48091
16,3	1,35778	36,3	1,39277	56,3	1,43365	76,3	1,48117
16,4	1,35794	36,4	1,39296	56,4	1,43387	76,4	1,48142
16,5	1,35810	36,5	1,39315	56,5	1,43410	76,5	1,48168
16,6	1,35826	36,6	1,39333	56,6	1,43432	76,6	1,48193
16,7	1,35842	36,7	1,39352	56,7	1,43454	76,7	1,48219
16,8	1,35859	36,8	1,39371	56,8	1,43476	76,8	1,48244
16,9	1,35875	36,9	1,39390	56,9	1,43498	76,9	1,48270
17,0	1,35891	37,0	1,39409	57,0	1,43520	77,0	1,48295
17,1	1,35907	37,1	1,39428	57,1	1,43542	77,1	1,48321
17,2	1,35924	37,2	1,39447	57,2	1,43565	77,2	1,48346
17,3	1,35940	37,3	1,39466	57,3	1,43587	77,3	1,48372
17,4	1,35956	37,4	1,39485	57,4	1,43609	77,4	1,48398
17,5	1,35973	37,5	1,39505	57,5	1,43632	77,5	1,48424
17,6	1,35989	37,6	1,39524	57,6	1,43654	77,6	1,48449
17,7	1,36005	37,7	1,39543	57,7	1,43676	77,7	1,48475
17,8	1,36021	37,8	1,39562	57,8	1,43698	77,8	1,48501
17,9	1,36038	37,9	1,39581	57,9	1,43721	77,9	1,48526
18,0	1,36054	38,0	1,39600	58,0	1,43743	78,0	1,48552
18,1	1,36070	38,1	1,39619	58,1	1,43765	78,1	1,48578
18,2	1,36087	38,2	1,39638	58,2	1,43788	78,2	1,48604
18,3	1,36103	38,3	1,39658	58,3	1,43810	78,3	1,48630
18,4	1,36120	38,4	1,39677	58,4	1,43833	78,4	1,48656
18,5	1,36136	38,5	1,39696	58,5	1,43855	78,5	1,48682
18,6	1,36152	38,6	1,39715	58,6	1,43877	78,6	1,48707
18,7	1,36169	38,7	1,39734	58,7	1,43900	78,7	1,48733
18,8	1,36185	38,8	1,39754	58,8	1,43922	78,8	1,48759
18,9	1,36202	38,9	1,39773	58,9	1,43945	78,9	1,48785

19,0	1,36218	39,0	1,39792	59,0	1,43967	79,0	1,48811
19,1	1,36235	39,1	1,39811	59,1	1,43990	79,1	1,48837
19,2	1,36251	39,2	1,39831	59,2	1,44012	79,2	1,48863
19,3	1,36268	39,3	1,39850	59,3	1,44035	79,3	1,48889
19,4	1,36284	39,4	1,39870	59,4	1,44057	79,4	1,48915
19,5	1,36301	39,5	1,39889	59,5	1,44080	79,5	1,48941
19,6	1,36318	39,6	1,39908	59,6	1,44103	79,6	1,48967
19,7	1,36334	39,7	1,39928	59,7	1,44125	79,7	1,48993
19,8	1,36351	39,8	1,39947	59,8	1,44148	79,8	1,49019
19,9	1,36367	39,9	1,39967	59,9	1,44170	79,9	1,49045
20,0	1,36384	40,0	1,39986	60,0	1,44193	80,0	1,49071

ANEXO II

Tabla de compensación de temperatura para soluciones azucaradas a 589nm a diferentes temperaturas, desarrollada por ICUMSA.

Temperature (°C)	Measured Sucrose (mass fraction)																	
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
15	+0.29	-0.30	-0.32	-0.33	-0.34	-0.35	-0.36	-0.37	-0.37	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.37	-0.37
16	-0.24	-0.25	-0.26	-0.27	-0.28	-0.28	-0.29	-0.30	-0.30	-0.30	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.30	-0.30	-0.30
17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21	-0.22	-0.22	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.22
18	-0.12	-0.13	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
19	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	+0.06	+0.07	+0.07	+0.07	+0.07	+0.07	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.07
22	+0.13	+0.14	+0.14	+0.14	+0.15	+0.15	+0.15	+0.15	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.15	+0.15	+0.15	+0.15
23	+0.20	+0.21	+0.21	+0.22	+0.22	+0.23	+0.23	+0.23	+0.23	+0.24	+0.24	+0.24	+0.24	+0.23	+0.23	+0.23	+0.23	+0.22
24	+0.27	+0.28	+0.29	+0.29	+0.30	+0.30	+0.31	+0.31	+0.31	+0.32	+0.32	+0.32	+0.32	+0.31	+0.31	+0.31	+0.30	+0.30
25	+0.34	+0.35	+0.36	+0.37	+0.38	+0.38	+0.39	+0.39	+0.40	+0.40	+0.40	+0.40	+0.40	+0.39	+0.39	+0.38	+0.38	+0.37
26	+0.42	+0.43	+0.44	+0.45	+0.46	+0.46	+0.47	+0.47	+0.48	+0.48	+0.48	+0.48	+0.48	+0.47	+0.47	+0.46	+0.46	+0.45
27	+0.50	+0.51	+0.52	+0.53	+0.54	+0.55	+0.55	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.55	+0.55	+0.54	+0.53	+0.52
28	+0.58	+0.59	+0.60	+0.61	+0.62	+0.63	+0.64	+0.64	+0.64	+0.65	+0.65	+0.64	+0.64	+0.63	+0.63	+0.62	+0.61	+0.60
29	+0.66	+0.67	+0.68	+0.70	+0.71	+0.72	+0.73	+0.73	+0.73	+0.73	+0.73	+0.73	+0.72	+0.72	+0.71	+0.70	+0.69	+0.67
30	+0.74	+0.76	+0.77	+0.78	+0.79	+0.80	+0.81	+0.82	+0.82	+0.82	+0.81	+0.81	+0.80	+0.80	+0.79	+0.78	+0.76	+0.75
31	+0.83	+0.84	+0.85	+0.87	+0.88	+0.89	+0.89	+0.90	+0.90	+0.90	+0.90	+0.89	+0.89	+0.88	+0.87	+0.86	+0.84	+0.82
32	+0.92	+0.93	+0.94	+0.96	+0.97	+0.98	+0.98	+0.99	+0.99	+0.99	+0.99	+0.98	+0.97	+0.96	+0.95	+0.93	+0.92	+0.90
33	+1.01	+1.02	+1.03	+1.05	+1.06	+1.07	+1.07	+1.08	+1.08	+1.08	+1.07	+1.07	+1.06	+1.04	+1.03	+1.01	+1.00	+0.98
34	+1.10	+1.11	+1.13	+1.14	+1.15	+1.16	+1.16	+1.17	+1.17	+1.16	+1.16	+1.15	+1.14	+1.13	+1.11	+1.09	+1.07	+1.05
35	+1.19	+1.21	+1.22	+1.23	+1.24	+1.25	+1.25	+1.26	+1.26	+1.25	+1.25	+1.24	+1.23	+1.21	+1.19	+1.17	+1.15	+1.13
36	+1.29	+1.30	+1.31	+1.33	+1.34	+1.34	+1.35	+1.35	+1.35	+1.34	+1.34	+1.33	+1.31	+1.29	+1.28	+1.25	+1.23	+1.20
37	+1.39	+1.40	+1.41	+1.42	+1.43	+1.44	+1.44	+1.44	+1.44	+1.43	+1.43	+1.41	+1.40	+1.38	+1.36	+1.33	+1.31	+1.28
38	+1.49	+1.50	+1.51	+1.52	+1.53	+1.53	+1.54	+1.54	+1.53	+1.53	+1.52	+1.50	+1.48	+1.46	+1.44	+1.42	+1.39	+1.36
39	+1.59	+1.60	+1.61	+1.62	+1.63	+1.63	+1.63	+1.63	+1.63	+1.62	+1.61	+1.59	+1.57	+1.55	+1.52	+1.50	+1.47	+1.43
40	+1.69	+1.70	+1.71	+1.72	+1.73	+1.73	+1.73	+1.73	+1.72	+1.71	+1.70	+1.68	+1.66	+1.63	+1.61	+1.58	+1.54	+1.51