

Proposal of the production design of a sunscreen for a cosmetic company

Gloria Castro , Noel García , Tony Espinosa * , Miguelangel Henríquez, Arianna Barrios

Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

 <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.22>

Abstract.- The production design included the formulation of the product and the modification of the existing equipment in the company for its elaboration. The base ingredients of the protector were selected according to availability and their proportions through pre-experimental tests, while for the 2 active principles: Titanium Dioxide and Octinoxate, a competition study and a hierarchical analysis method were used for their choice, respectively. The proportions of the active principles was an experimental adjustment parameter proposing an experimental design of the mixture, resulting in 5 proposals that were given the same treatment for their elaboration at scale. The chosen formulation turned out to have the following properties: $pH = (6,49 \pm 0,01)$, Viscosity = (7000 ± 200) cP, density = $(0,99 \pm 0,01)$ g/mL and *in vitro* SPF $(13,9 \pm 0,1)$, being also stable after 4 weeks of heat stress cycles. For its elaboration on an industrial scale, the following changes were suggested: increasing the supply of hot water with 2 electric heaters, the sizing of a new stirring system and the determination of the required power (2 hp) and a double pneumatic diagram pump with a dynamic load equal to $(5,4 \pm 0,8)$ m.

Keywords: scaling; formulation; emulsion; cosmetics; sunscreen; agitated tanks.

Propuesta del diseño de producción de un protector solar para una empresa cosmética

Resumen.- El diseño de producción incluyó la formulación del producto y la modificación de los equipos existentes en la empresa para su elaboración. Se seleccionaron los ingredientes base del protector de acuerdo a la disponibilidad y sus proporciones mediante ensayos pre-experimentales mientras que para los 2 principios activos: dióxido de titanio y octinoxato fue empleado estudio de la competencia y un método de análisis jerárquico para su elección, respectivamente. Las proporciones de los principios activos fue un parámetro de ajuste experimental planteando un diseño experimental de mezcla, resultando 5 propuestas a las que se les dio el mismo tratamiento para su elaboración a escala. La formulación escogida resultó tener las siguientes propiedades: $pH = (6,49 \pm 0,01)$, viscosidad = (7000 ± 200) cP, densidad = $(0,99 \pm 0,01)$ g/mL y FPS *in vitro* $(13,9 \pm 0,1)$, siendo además estable a 4 semanas de ciclos de estrés térmico. Para su elaboración a escala industrial se sugirieron los siguientes cambios: aumentar el suministro de agua caliente con 2 calentadores eléctricos, el dimensionamiento de un nuevo sistema de agitación y la determinación de la potencia requerida (2 hp) y una bomba de doble diafragma neumática con una carga dinámica igual a $(5,4 \pm 0,8)$ m.

Palabras clave: escalamiento; formulación; emulsión; cosméticos; protector solar; tanques agitados.

Recibido: 30 de mayo, 2021.

Aceptado: 18 de julio, 2021.

1. Introducción

Los filtros solares, son compuestos que o bien dispersan con eficacia la luz incidente (filtros inorgánicos) o bien absorben la porción eritemógena (filtros orgánicos) de la energía radiante del sol.

Estos compuestos cuando se aplican en la piel en estados secos o incorporados en vehículos adecuados son denominados protectores solares [1]. Desde el punto de vista de la salud, los protectores solares deberían ser de uso obligatorio para cualquier persona debido a los efectos que acarrea la luz ultravioleta (UV) generada por el sol, contándose entre los principales el cáncer de piel, afectando actualmente entre 2 y 3 millones de personas en todo el mundo cada año [2].

La formulación de este tipo de productos agrupó la revisión de una gran cantidad de elementos como base de análisis para obtener el resultado

* Autor para correspondencia:

Correo-e: tony_paz@hotmail.com (T. Espinosa)

final deseado como: las cremas cosméticas, siendo un punto de partida importante en trabajos de investigación aplicados en la industria como [3, 4, 5, 6, 7]; los filtros solares que a raíz de la gran cantidad de opciones y posibles combinaciones establecen un reto para elegirlos siendo necesario consultar recopilaciones de estos como [1, 2, 8, 9, 10, 11, 12]; métodos generales para la selección de alternativas dados por [13]; la estabilidad y preservación de emulsiones tratado por [14, 15]; la evaluación de la eficacia de los protectores solares mediante pruebas *in vitro* como es desarrollado por [16] y [17].

Por su parte a nivel industrial mucha información de valor puede obtenerse mediante escalamientos de las metodologías y condiciones planteadas a nivel de piloto como bien es expuesto por [18, 19].

Todas estas contribuciones permitieron trazar un plan para el desarrollo de una gama de formulaciones, la selección de la mejor de estas y plantear modificaciones a equipos ya disponibles para su elaboración.

2. Metodología

2.1. Desarrollo de formulaciones asociadas a protectores solares como alternativas del producto a elaborar

Fueron investigados los compuestos generalmente usados en los protectores solares mediante consultas bibliográficas [1] y evaluación de la competencia y se contrastaron estos con las materias primas utilizadas en la industria para la elaboración de productos como los de pre y post tratamiento capilar.

En base a coincidencias entre ambos grupos se seleccionaron los compuestos que constituirán los excipientes y aditivos finales del protector solar a formular.

Considerando el uso de filtros inorgánicos y orgánicos en el producto final, se escogieron los primeros a partir de consultas bibliográficas y para los segundos se empleó para su selección, considerando los disponibles en el mercado, el método de análisis jerárquico [13].

Se agruparon debido a su importancia los ingredientes en: “base” (excipientes, aditivos y

un principio activo) y “variantes” (principios activos principales), definiendo sus proporciones por ensayos pre-experimentales para los primeros (proporciones fijas en cada formulación) y un diseño experimental de mezclas para los segundos empleando para este el software Minitab18, obteniéndose el número de formulaciones finales a elaborar a fin de seleccionar una de ellas para la producción a gran escala.

2.2. Establecimiento de las condiciones requeridas a escala de laboratorio para la elaboración de cada fórmula desarrollada, definiendo los parámetros necesarios para el posterior escalamiento a nivel industrial

Fueron seleccionados los equipos a emplear para el sistema de formulación a escala y definidas las dimensiones básicas del mismo a fin de lograr un acuerdo entre: lo disponible en la industria actualmente, lo sugerido en [18, 6] para la formación de emulsiones cosméticas y lo disponible en el laboratorio.

De igual forma, mediante ensayos pre-experimentales y consideraciones teóricas, se fijaron las condiciones requeridas para la obtención de muestras estables (temperaturas, velocidades y tiempos de agitación) con el sistema a escala seleccionado.

2.3. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas, estabilidad y el factor de protección solar (FPS) *in vitro* de las fórmulas desarrolladas, para la selección de la más idónea a ser fabricada

Para cada formulación elaborada fueron obtenidas las propiedades fisicoquímicas: pH [20], viscosidad [21] y densidad (mediante método gravimétrico).

Para medir la efectividad fotoprotectora de las formulaciones fue empleado el método de Mansur [16]; aplicándolo de la misma forma, a una muestra de la competencia para fines comparativos.

Finalmente, la estabilidad preliminar de las formulaciones fue sometida a pruebas mediante ciclos de estrés térmico [14].

2.3.1. *Definición de las condiciones de operación para la producción de protector solar a nivel industrial, considerando el uso los equipos ya existentes, efectuando con ello la reingeniería básica del proceso.*

Tomando en cuenta las sugerencias aportadas en la bibliografía [18] se plantearon modificaciones a los componentes y dimensiones del sistema de agitación instalado en la empresa a fin de asegurar la correcta formulación del producto.

Para estimar la velocidad de agitación requerida en el sistema propuesto se emplearon criterios de escala [19], a su vez fue calculada a partir de este y otros datos la potencia requerida del motor.

De la misma forma se realizaron cambios en la capacidad del sistema de dosificación de agua caliente y en el trasiego del producto terminado al área de envasado incluyendo una bomba y calculando la carga dinámica de la misma [22].

3. Resultados y discusión

3.1. *Desarrollo de formulaciones asociadas a protectores solares como alternativas del producto a elaborar*

De acuerdo con las coincidencias entre: los componentes usualmente empleados en protectores solares reseñados en [1] o evidenciados en la competencia presente en el mercado venezolano y las materias primas utilizadas y disponibles en la industria para la elaboración de productos de cuidado capilar fueron seleccionados primeramente los ingredientes reseñados en la Tabla 1, donde se presentan igualmente las funciones que se espera cumplan en el producto final.

Los ingredientes hasta ahora considerados conformaran la “base” del producto y por si solos no presentan actividad fotoprotectora alguna requiriendo la adición de los principios activos.

Respecto a los filtros UV inorgánicos, a fin de seguir la tendencia de la competencia, fueron elegidos: el dióxido de titanio y el óxido de zinc.

Con la finalidad de plantear un número manejable de formulaciones, fue seleccionado el dióxido de titanio como compuesto a variar para el diseño de mezcla empleado, por ser el más común en los productos de la competencia analizados

Tabla 1: Compuestos iniciales considerados para el producto

Compuesto	Función
Agua de procesos	Aporta volumen y disminuye la viscosidad de la emulsión. [3]
Ácido esteárico (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	Reaccionando con el NaOH para formar el estearato de sodio, que actúa como un emulgente tipo aceite en agua. [3]
Alcohol cetílico (C ₁₆ H ₃₄ O)	Co-emulsionante.[3]
Aceite mineral	Emoliente e hidratante a la piel. [3]
Ácido cítrico (C ₆ H ₈ O ₇)	Acidulante y quelante (bloqueando el hierro requerido para el metabolismo y crecimiento microbiano). [15]
Glicerina (Solución de C ₃ H ₈ O ₃)	Reductor de la viscosidad / Humectante. [3]
Hidróxido de sodio al 50 % (NaOH)	Neutralizante. [3]
Perfume de coco	Proporciona un agradable aroma. [4]

y poseer mayor eficiencia en la reflexión de las longitudes de onda UVB frente al óxido de zinc [8]. Pasando este último a ser un compuesto más de la “base” del producto.

Para los filtros orgánicos fue encontrado un único proveedor que disponía en plaza tres de los filtros investigados (Benzofenona-3, Octinoxato y Octocrileno). Previendo la adquisición de solo uno de los compuestos ofrecidos (por razones de costo) se decidió aplicar el método de análisis jerárquico (AHP) [13].

Para aplicar la metodología fueron definidos los siguientes criterios: riesgos para la salud (MSDS de los compuestos [23, 24, 25]), precio en el mercado (dado por el proveedor) y efectividad (Determinado por el rango de absorbancia UV efectiva [9]).

Las matrices iniciales para el método, donde se puntúan las alternativas y los criterios, se muestran en las Tablas 2 y 3. Adicionalmente, los resultados finales, posterior a la aplicación del análisis, se muestran en la Tabla 4. Siendo evidente la elección del Octinoxato, como filtro UV orgánico a utilizar.

Teniendo los ingredientes a emplear, los atributos requeridos del producto final fueron definidos como: “un producto ligero, sin sensación grasosa, con buena dispersión, evanescente, de viscosidad media (a fin de que pueda fluir en los envases escogidos para su almacenamiento),

Tabla 2: Matriz de comparación de pares de alternativas

Criterios	Riesgos para la salud			Precio en el mercado			Efectividad		
	EMC	BZ3	OCR	EMC	BZ3	OCR	EMC	BZ3	OCR
Alternativas									
EMC	1,00	5,00	7,00	1,00	7,00	5,00	1,00	0,14	1,00
BZ3	0,20	1,00	3,00	0,14	1,00	0,33	7,00	1,00	7,00
OCR	0,14	0,33	1,00	0,20	3,00	1,00	1,00	0,14	1,00

EMC: etilhexil p-metoxicinamato (Octinoxato), BZ3: benzofenona-3 (Oxibenzona), OCR: Octocrileno.

Tabla 3: Matriz de comparación de pares de criterios

Criterios	Riesgos para la salud	Precio en el mercado	Efectividad
Riesgos para la salud	1,00	0,33	7,00
Precio en el mercado	3,00	1,00	7,00
Efectividad	0,14	0,14	1,00

Tabla 4: Resultados del vector de prioridad de las alternativas

Alternativas	Prioridad
Octinoxato	68,31 %
Benzofenona-3	16,33 %
Octocrileno	15,36 %

visualmente agradable, sin grumos y estable a temperaturas de almacenamiento elevadas”.

Con miras a obtener las propiedades cualitativas requeridas de forma preliminar en la base del producto, la misma fue modificada, mediante estudios pre-experimentales obteniendo las proporciones de la Tabla 5.

Esta base (y los ingredientes presentes en la misma), representará un porcentaje fijo en las propuestas de formulación del producto (92,5 %). El porcentaje restante será igual a la suma de las proporciones de los compuestos elegidos para el diseño (7,5 %), variando dichas proporciones según el diseño experimental de mezclas.

Tabla 5: Base final propuesta

Compuesto	Dosis (%)
Agua	91,7575
Ácido esteárico	3,6747
Aceite mineral	3,0617
Glicerina	0,0815
Alcohol cetílico	0,8162
Hidróxido de sodio al 50 %	0,0814
Óxido de Zinc	0,0541
Ácido cítrico	0,4081
Perfume	0,0649

Para este último, debido a limitaciones en la

cantidad disponible de los ingredientes, fueron escogidos solo dos compuestos a variar siendo estos: el principio activo orgánico (octinoxato) y uno de los activos inorgánico (dióxido de titanio).

El porcentaje a considerar como cota superior para el Octinoxato fue de 7,5 %, siendo la máxima cantidad segura a dosificar en Estados Unidos (según FDA) y Korea [10].

Por otro lado, para el dióxido de titanio la proporción máxima a dosificar fue igual a 1 %, escogiendo este valor frente al máximo recomendando (igual a 25 %) al ser el límite a partir del cual se empiezan a observar aglomeraciones de partículas (grumos) en el producto.

La determinación de las proporciones a utilizar de los compuestos seleccionados, y el diseño de mezcla propiamente dicho, fue realizada con el Software Minitab18 y se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Formulaciones a elaborar a escala como alternativas del producto, según diseño experimental de mezclas

Cod. de la Formulación	Proporción de Octinoxato (%)	Proporción de TiO ₂ (%)
CN1	6,50	1,00
CN2	6,75	0,75
CN3	7,00	0,50
CN4	7,25	0,25
CN5	7,50	0,00

3.2. *Establecimiento de las condiciones requeridas a escala de laboratorio para la elaboración de cada formula desarrollada, definiendo los parámetros necesarios para el posterior escalamiento a nivel industrial*

El sistema a escala debe comprender mínimamente un recipiente de geometría similar al tanque de formulación y un sistema de agitación concéntrico a dicho recipiente.

Se simuló el tanque con un beaker de 250 mL marca PIREX, al no contar con modelos a escala precisos de los tanques de formulación, realizando lotes de 200 g de cada formulación planteada.

Un cambio significativo en el sistema a escala empleado frente al presente en la industria, previendo esta vez una mejora en la calidad del producto final, radica en el impelente empleado en el sistema de agitación.

Los agitadores de claro cerrado (como los de tipo anclaje instalados en los tanques de formulación de la empresa), son usados para agitación de fluido líquidos viscosos, pero no son buenos para operaciones de mezclado [19], esto debido a las bajas velocidades alcanzadas por su eje [26] y a la ausencia casi total de flujo axial y, como consecuencia, la nula homogenización de la parte superior al fondo [1].

Algunas de estas características que resultan ser ventajosas en la formulación de productos capilares, como las bajas velocidades para evitar la formación de espuma, son totalmente inviables para procesos de emulsificación como el esperado en el protector solar ya que, en general, es requerida una intensa turbulencia que conduce a la dispersión efectiva de la fase interna en forma de gotas [18].

Los impelentes disponibles a escala de laboratorio son del tipo: paletas y hélice marina con aspas cortas, pueden obtenerse resultados de diseño preliminares de mayor valor (dada la extensa data registrada) con el agitador de hélice, siendo este el elegido.

Como último elemento a incluir en el modelo a escala se tienen baffles ó deflectores para garantizar una dispersión general más rápida de la fase interna y evitar la formación de capas asentadas [18].

En cuanto a geometría y ubicación de los elementos se quiso seguir el diseño estándar [27],

objetivo alcanzado de forma aproximada en la mayoría de las proporciones como se muestra en la (Figura 1 y la Tabla 7) con una notable diferencia en la altura del impelente desde el fondo del recipiente siendo esta mayor a la típica.

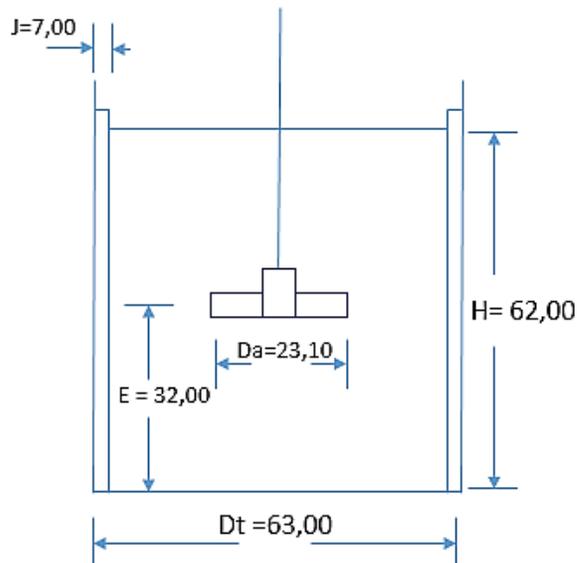


Figura 1: Medidas finales del sistema de formulación a escala (en mm)

Se justifica este último hecho en la pobre integración (estancamiento) y lenta fundición del ácido esteárico y el alcohol cetílico en las etapas iniciales de la formulación siguiendo la ubicación estándar, efectos que mejoran considerablemente al elevar la hélice.

Se quiso evaluar la formulación del protector solar empleando siguiendo la forma general de la metodología utilizada actualmente para la elaboración de sus productos de cuidado capilar que fueron el punto de partida. Teniéndose 3 etapas básicas: Dosificación del agua caliente, fundición y dilución de los componentes sólidos y líquidos, enrasamiento del volumen de formulación con agua sin calentar.

Así, en el sistema a escala, se buscó emplear un único recipiente para los procesos de: fundición, emulsificación y dispersión que se prevén durante la formulación del producto final.

En ese orden, como medio de calentamiento para la fundición de la fase grasa sólida se empleó el agua de procesos debiendo así garantizarse una

Tabla 7: Comparaciones entre las proporciones del sistema a escala y el valor estándar

Proporción	Valor de la proporción estándar	Valor de la proporción real	Desviación de la proporción real respecto a la estándar (%)
Da/Dt	0,33 [21]	0,37	10
H/Dt	1,00 [21]	0,98	-2
j/Dt	0,08–0,1[8]	0,11	11*
E/Dt	0,33[21]	0,51	52

temperatura de la misma de alrededor de 80 °C, siendo esta mayor a la temperatura de fundición del ácido esteárico (de alrededor de 69 °C) [28] y del alcohol cetílico (de alrededor de 50 °C) [29].

La cantidad de agua empleada inicialmente fue igual a 80 % de la total, esta evita la separación prematura de la emulsión al agregar la proporción restante del agua más adelante.

Esta última salvedad marca una diferencia significativa respecto a la cantidad inicial de agua adicionada típicamente (alrededor de 20 %) para elaborar los productos capilares.

Siguiendo con la formulación y a razón de aprovechar la temperatura inicial del agua de proceso se adicionó primeramente el ácido esteárico y, posterior a su fundición, el alcohol cetílico. Una velocidad del impulsor de 600 rpm garantizó un buen contacto entre la fase sólida y la líquida, y la fundición efectiva de la primera en un corto tiempo.

La agitación se mantiene al agregar: el aceite mineral, el octinoxato y la glicerina a la mezcla final. En este punto y como es de esperar se observó en la mezcla dos fases líquidas (Figura 2): una orgánica (compuesta de ácido esteárico, aceite mineral y octinoxato) y una acuosa (agua, glicerina).

El añadir hidróxido de sodio al 50 % a la mezcla ocasiona la reacción del mismo con el ácido esteárico para generar estearato de sodio, el efecto emulsionante de este último se aprecia instantáneamente con la integración de la fase orgánica en la acuosa formando la emulsión propiamente dicha (Figura 2).

Para este punto, y a fin de generar una buena distribución de las gotas de la fase interna [5], la velocidad de rotación fue aumentada a 1000 rpm a



(a) Fase grasa y acuosa inicial



(b) Inicio de la dispersión de la fase grasa (interna) en la fase acuosa (continua)

Figura 2: Proceso de mezclado y emulsificación a escala

su vez se mantuvo la misma durante 6 min.

Transcurrido el tiempo estipulado fue adicionada el 20 % del agua de formulación siendo diluida en la misma la cantidad requerida de ácido cítrico, la temperatura de agua fue la del ambiente (25 °C). Y el tiempo estipulado para la mezcla fue de 2 min.

Un aspecto importante a mencionar en este punto es que la viscosidad, la tixotropía y el “tacto” del producto durante su elaboración distan mucho del valor que presentan estas propiedades en el producto final, mostrándose visiblemente muy fluida [6].

El espesamiento posterior ocurre varios minutos después de la fabricación, debiéndose al enfriamiento de la emulsión y, con ello, a la cristalización del ácido esteárico libre (o complejos simples de él) [1].

Esta característica es particularmente útil en las etapas siguientes, pues facilita enormemente

la dispersión de las partículas sólidas insolubles (principios activos inorgánicos) y, extrapolando a escala industrial, la dosificación del producto a la llenadora.

Finalizando la formulación, y para la correcta integración del óxido de zinc y el dióxido de titanio en la fórmula (debido a la ausencia de discos dispersores) fue requerido elevar la velocidad de rotación a 1500 rpm. Su dosificación fue escalonada, añadiendo primero el óxido de zinc manteniendo la agitación por 2 min y posteriormente el dióxido de titanio por 8 min.

El añadir esté último en las formulaciones CN1, CN2, CN3 y CN4 aumenta considerablemente su blancura frente a CN5 en la cual el compuesto se encuentra ausente del todo. Posteriormente, se detiene la agitación, restando adicionar el perfume. Siendo este componente muy sensible a la degradación térmica [1] y por recomendación de [6] fue requerido esperar a que la temperatura alcanzara los 40 °C para su dosificación iniciando nuevamente la agitación a 1500 rpm y manteniéndola por al menos 2 min.

3.3. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas, estabilidad y el factor de protección solar (FPS) in vitro de las fórmulas desarrolladas, para la selección de la más idónea a ser fabricada

3.3.1. Determinación de la viscosidad

Tomando como base el manual correspondiente al equipo para la medición de esta propiedad [21], se reportan los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8: Viscosidades de las formulaciones realizadas

Formulación	Viscosidad ($\mu \pm 200$) cP
CN-1	9600
CN-2	8800
CN-3	7000
CN-4	10600
CN-5	17600

Temperatura ambiente = (23 ± 1) °C

Temperatura de la muestra = (251) °C

N° Spin: 5, Velocidad: 10 rpm, Factor: 400

Como se observa existen variaciones entre los resultados, estos sin embargo entran dentro del

rango teóricamente sugerido para este tipo de productos de 4000 a 18000 cP [4].

La viscosidad de una emulsión es afectada por múltiples factores, como: la viscosidad de la fase externa, la proporción volumétrica de la fase interna, el tamaño de las gotas, su distribución, la dispersión de los sólidos, etc [5].

Pequeñas variaciones de agua por evaporación durante el calentamiento pueden causar efectos que no pueden ser seguidos en la fase externa.

Por otro lado, en teoría un aumento de la fase interna del producto, aumenta la viscosidad [5], ésta es conformada por el octinoxato y el dióxido de titanio. En las formulaciones se aumenta uno mientras se disminuye el otro, así de CN1 a CN3 parece evidenciarse que la disminución del dióxido de titanio tiene un efecto mayor que el aumento del octinoxato en la propiedad. Este patrón no se sigue en CN4 y CN5.

Ante esto, resulta complejo definir una razón clara para la tendencia obtenida de la propiedad para cada formulación.

A pesar de ello, fue realizada la regresión matemática por medio del software Minitab18, que describe el comportamiento de esta propiedad respecto al octinoxato y al dióxido de titanio, con un coeficiente de determinación (R^2) de 98,48 % evidenciados en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad} = & 17720 \cdot X_{\text{Oct}} - 6880864 \cdot X_{\text{TiO}_2} \\ & + 11520947 \cdot X_{\text{Oct}} \cdot X_{\text{TiO}_2} \\ & - 4950371 \cdot X_{\text{Oct}} \cdot X_{\text{TiO}_2} \cdot (X_{\text{Oct}} - X_{\text{TiO}_2}) \end{aligned} \quad (1)$$

Los valores de ésta y todas las demás propiedades de cada muestra fueron ajustadas utilizando el software Minitab18, siendo necesario normalizar las proporciones de los compuestos del diseño experimental tal que su suma sea del 1 % para lograr generar correctamente el polinomio de análisis de respuesta, por lo tanto, la dosificación de Octinoxato (7,50 %) se ajustó al 1 %, y la del dióxido de titanio (de 1,00 %) a 0,1333 %.

Adicional a estas mediciones, fueron realizadas evaluaciones de viscosidad en función de la velocidad de medición para la formulación elegida

a fabricar, a fin de definir el comportamiento de dicha emulsión como fluido (newtoniano o no newtoniano) y características del mismo, siendo un parámetro importante para el diseño del agitador propuesto.

3.3.2. Determinación del pH

Utilizando la norma correspondiente para la medición de esta propiedad [20], se reportan los resultados en la Tabla 9.

Estos resultados fueron los esperados, debido a que pH ligeramente ácidos ayudan a no ocasionar cambios en el pH de la piel [7].

Tabla 9: pH de las formulaciones realizadas

Formulación	Potencial de hidrógeno (pH ± 0,01) adim
CN-1	6,50
CN-2	6,55
CN-3	6,49
CN-4	6,54
CN-5	6,57

Temperatura de la muestra= (25 ± 1) °C

Las pequeñas variaciones entre las formulaciones no se deben propiamente a las proporciones de los filtros UV sino más bien a la imprecisión en las dosificaciones del hidróxido de sodio, ácido esteárico y cítrico respecto a la masa requerida.

Realizando la regresión matemática de igual manera, por medio del software Minitab18, con un coeficiente de determinación (R^2) de 61,96 % dados por la ecuación (2).

$$\begin{aligned}
 ph = & 6,575 \cdot X_{oct} - 154 \cdot X_{TiO_2} \\
 & + 259 \cdot X_{oct} \cdot X_{TiO_2} \\
 & - 101 \cdot X_{oct} \cdot X_{TiO_2} \cdot (X_{oct} - X_{TiO_2})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

3.3.3. Determinación de la densidad de la muestra

Utilizando el método gravimétrico, se obtuvieron los resultados que se reportan en la Tabla 10.

Se evidencia una pequeña tendencia decreciente de acuerdo al incremento de la fase orgánica (octinoxato) en la emulsión, lo cual es de esperarse precisamente por las características del compuesto orgánico (cuya proporción va en aumento) siendo menos denso que el agua.

Tabla 10: Densidad de las formulaciones realizadas

Formulación	Densidad ($\rho \pm 0,01$) g/mL
CN-1	0,99
CN-2	0,99
CN-3	0,99
CN-4	0,99
CN-5	0,98

Temperatura de la muestra= (25 ± 1) °C

Realizando la regresión matemática de igual manera, por medio del software Minitab18, con un coeficiente de determinación (R^2) de 98,21 % se dan por la ecuación (3).

$$\begin{aligned}
 Densidad = & 0,98014 \cdot X_{oct} + 18,14 \cdot X_{TiO_2} \\
 & - 28 \cdot X_{oct} \cdot X_{TiO_2} \\
 & + 11,25 \cdot X_{oct} \cdot X_{TiO_2} \cdot (X_{oct} - X_{TiO_2})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3.3.4. Determinación del FPS

Utilizando el método de Mansur [16], se obtuvieron las absorbancias por longitud de onda de todas las muestras y para un producto de referencia presente en el mercado (Figura 3), las cuales fueron procesadas según las ecuaciones que dicta el método, para finalmente definir los factores de protección de cada formulación y del producto de la competencia seleccionado.

Realizando un análisis gráfico con la Figura 3, se tiene para todas las muestras formuladas un pico máximo de absorción en la longitud de onda de aprox. 312 nm, el valor es cercano al teórico presentado para el octinoxato que es 311 nm [10], siendo justificada la pequeña variación por el paso utilizado en el equipo (± 2 nm).

En la mayoría de los casos, en las muestras formuladas, se da un aumento en las absorbancias a la par en que fue aumentada la proporción del principio activo como es esperado debido a la mayor cantidad de octinoxato, siendo una notable excepción a esta tendencia CN4, cuya curva promedio se encuentra por debajo de la curva asociadas a las muestras CN5, CN3 y CN2.

Este hecho se puede explicar por la distribución no del todo homogénea que presentan las gotas de la fase interna en cualquier emulsión, produciendo

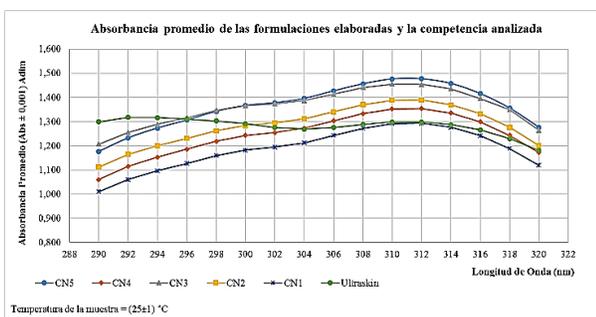


Figura 3: Absorbancia promedio de las muestras evaluadas en función de la longitud de onda

errores a la hora de muestrear dichos sistemas obteniendo resultados no del todo representativos.

Por su parte, en la curva de absorbancia del producto de la competencia analizado, se presentan dos picos en 312 nm y 294 nm. El primero de los valores, como ya se indicó, es próximo al valor del octinoxato, mientras el segundo se encuentra cercano al extremo mínimo de medición y pudo corresponder a los valores posteriores a uno de los máximos de la oxibenzona de 288 nm (presentando el compuesto dos máximos teóricos adicionales en 241 nm y 324 nm) [11], ambas materias primas son declarados en los ingredientes del producto.

En comparación con la competencia analizada, la mayoría de las formulaciones presenta una absorbancia mayor a partir de 300 nm, aproximadamente. En el intervalo anterior a 300 nm y alrededor de la longitud de onda crítica para la aparición del eritema, igual a 297 nm [1], la muestra CN3 supera a la competencia.

Finalmente, y a partir de ese punto, el producto comercial aumenta su absorbancia hasta llegar a superar a todas las muestras propuestas, comportamiento justificado por la inclusión de otro principio activo entre sus ingredientes.

Este hecho puede reflejarse de igual manera y de forma cuantitativa si se analiza el FPS *in vitro* calculado (Tabla 11, siendo la competencia superada por la mayoría de las formulaciones (a excepción de CN1). Sin embargo, el FPS declarado por la competencia es de 30, por lo que se tiene una desviación negativa, respecto al valor declarado, igual al 57,17 %.

La desviación en la estimación dada por el

Tabla 11: Factor de Protección Solar de las formulaciones realizadas y de la competencia analizada calculado por el método *in vitro* de Mansur

Muestra	FPS <i>in vitro</i> (FPS ± 0,1) adim
Producto de la Competencia	12,9
CN1	12,1
CN2	13,1
CN3	13,9
CN4	12,7
CN5	14,0

método *in vitro* era esperada, varios autores [12, 17] recomiendan tomar con reservas los valores dados por este método en la estimación de FPS *in vivo* altos (mayores a 15).

Esto significa que posiblemente se tengan FPS mayores a los estimados para las formulaciones propuestas; sin embargo, y debido a la limitación en aplicar métodos *in vivo* para la comprobación de esta hipótesis, se tomaron dichos valores la clasificación de las muestras obteniéndose filtros solares en la categoría PCD4 (Productos de Máxima Protección Solar), que ofrecen la máxima protección a quemaduras solares, permitiendo escaso o ningún bronceado [1].

Realizando la regresión matemática de igual manera, por medio del software Minitab18, con un coeficiente de determinación (R^2) de 100 % dados por la ecuación (4).

$$FPS = 13,97 \cdot X_{Oct} - 146380 \cdot X_{TiO_2} - 267,166 \cdot X_{Oct} \cdot X_{TiO_2} + 170,738 \cdot X_{Oct} \cdot X_{TiO_2} \cdot (X_{Oct} - X_{TiO_2}) - 50,098 \cdot X_{Oct} \cdot X_{TiO_2} \cdot (X_{Oct} - X_{TiO_2})^2 \quad (4)$$

3.3.5. Análisis de estabilidad

Las muestras fueron sometidas a 8 ciclos de 24 horas (4 Semanas) en estufa (42 °C) y Nevera (5 °C). El análisis mostró que todas las formulaciones fueron estables respecto al color, sin embargo, sí se presentaron desviaciones en la intensidad del perfume respecto a los patrones, siendo más notable en las formulaciones CN1, CN4 y CN5, a pesar de esto, el perfil de perfume no presentó cambios durante el análisis.

Esta desviación es aceptada ya que los ciclos a los que fueron expuestas las muestras son condiciones extremas y que además el perfume es volátil, por lo que se podría recomendar una dosificación mayor del mismo.

3.3.6. Análisis de resultados y elección de la formulación más idónea a elaborar

Se requiere una formulación que se ajuste a las especificaciones solicitadas al inicio del desarrollo de este producto. Es decir, donde pueda visualizarse la sinergia entre un producto ligero, evanescente (viscosidad moderada) y eficiente como protector solar (FPS alto), siendo ésta la característica más importante para este desarrollo.

Se esperaban resultados mayores de factor de protección solar en las formulaciones de mayor contenido de Octinoxato, pero como se expuso anteriormente, CN4 no mantiene la tendencia esperada. Por consiguiente, las formulaciones con mayor FPS son CN3 y CN5, siendo así descartadas para su elección entonces, respecto a este parámetro, CN1, CN2 y CN4.

En lo concerniente a la viscosidad CN3 obtuvo el menor resultado entre todas, en cambio CN5 fue la más viscosa, no cumpliendo además con la característica de evanescencia deseada, por lo que en relación a esto la misma es descartada.

Por consiguiente, se selecciona como la formulación más idónea a ser elegida para su producción CN3 (7,00 % octinoxato y 0,50 % dióxido de titanio), siendo su fórmula presentada en la Tabla 12.

Tabla 12: Dosificaciones de la fórmula elegida (CN-3)

Compuesto	Dosis (%)
Agua	91,7575
Ácido esteárico	3,6747
Aceite mineral	3,0617
Octinoxato	7,0000
Glicerina	0,0815
Alcohol cetílico	0,8162
Hidróxido de sodio al 50 %	0,0814
Óxido de zinc	0,0541
Dióxido de titanio	0,5000
Ácido cítrico	0,4081
Perfume	0,0649

3.4. Definición de las condiciones de operación para la producción de protector solar a nivel industrial, considerando el uso los equipos ya existentes, efectuando con ello la reingeniería básica del proceso

Se decidió enfocar la propuesta de acondicionamiento y rediseño en tres aspectos en específico: garantizar la dosificación de agua caliente, contar con un sistema de agitación acorde para lograr una emulsión estable y facilitar la dosificación del producto elaborado a la etapa de llenado; desarrollando con más detenimiento la segunda de estas.

3.4.1. Dosificación de agua caliente

A fin de garantizar la dosificación inicial de agua, empleada en el sistema a escala, se planteó aumentar el número de calentadores instalados a 3, siendo todos de las mismas características del actualmente disponible, permitiendo con ello una dosificación máxima de 600 L de agua a $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, unos 583 kg, siendo mayor a la requerida inicialmente para lotes de 800 L de protector solar (unos 792 kg aproximadamente, dada la densidad del producto).

3.4.2. Sistema de agitación y mezclado

Los agitadores disponibles en ambos tanques son de tipo anclaje no siendo la mejor opción a la hora de formular productos emulsionados, esto en función a las bajas velocidades de operación y el nulo flujo axial que presentan.

Esto último plantea la sustitución de los mismos por un impelente que garantice las labores a realizar en el tanque. Entre los existentes, destaca la turbina tipo Rushton de seis palas estables ya que, gracias a su geometría, ofrecen una buena cizalla con la que las gotas dispersas se rompen en un tamaño menor a medida que circulan y esto, junto a la elevada turbulencia y el flujo radial generado, da como resultado una mejor distribución de las mismas [18].

Además de esto, resulta recomendable la instalación de un sistema de baffles o desviadores a fin de garantizar una buena integración de las fases en las etapas de emulsificación [19].

Para definir la potencia del nuevo sistema de agitación se requirió a groso modo seguir los siguientes pasos: estimar los datos fisicoquímicos de la mezcla a agitar (viscosidad y densidad), especificar las dimensiones y condiciones del sistema (velocidad de agitación y proporciones entre los elementos) y el uso de números adimensionales y gráficas de dependencia entre ellos.

El producto en proceso dista mucho de las características del producto final, así pues se define como etapa crítica para el primero de los pasos en el cálculo de potencia, la dosificación del perfume ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) en la cual el protector solar presenta la mayor viscosidad aparente y por tanto se espera requiera la mayor potencia para lograr una agitación efectiva.

En función a su condición no newtoniana, característica de esta clase de productos, y a la necesidad de los parámetros de flujo (índice de consistencia de flujo e índice de comportamiento de flujo) para cálculos posteriores se determinaron los valores de viscosidad a $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para CN-3 a distintas tasas de corte (Tabla 13) y a partir de estos los parámetros de flujo correspondientes (Tabla 14), empleando para ello la ecuación de la recta dada de la regresión de la curva de la Figura 4 y homologando sus valores a los coeficientes de la ecuación de Ostwald de Waele linealizada [3].

Tabla 13: Viscosidad de la muestra CN3 a $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a distintas velocidades de corte

Velocidad de corte (N) (rpm)	Viscosidad ($\mu \pm 200$) cP
2	9000
4	5000
5	4400
10	2400
20	1400
50	680
100	440

Spin: 5; $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 3\text{ min}$

Siguiendo con los pasos para el cálculo de potencia, un aspecto importante a considerar antes de delimitar las dimensiones del sistema de agitación es la necesidad de los tanques de formulación de instalar más de un impelente sobre su eje. El número requerido de estos elementos

queda definido por la relación entre la altura del líquido (H) y el diámetro del tanque (D_t) la cual, considerando lotes de 800 L de producto (capacidad máxima de los tanques) y en la etapa final de la formulación, puede ser estimada como $(1,76 \pm 0,08)$, siendo mayor al 1,4 (máximo valor teórico para un impelente definido para la mezcla de líquidos)[3], requiriendo cada tanque la instalación de dos impelentes.

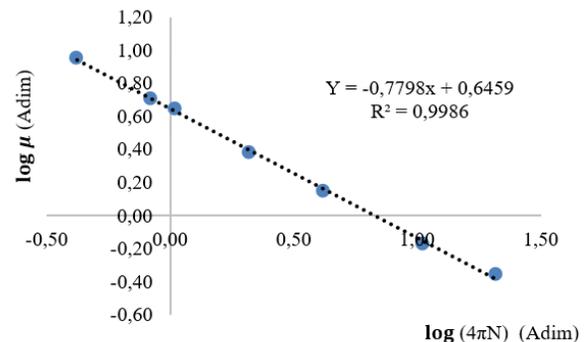


Figura 4: Variación del $\log \mu$ respecto al $\log (4\pi N)$ de la ecuación de Ostwald de Waele

Tabla 14: Parámetros de flujo para la muestra CN3 a $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Índice de Consistencia de flujo (K) ($\text{kg}/\text{ms}^{1,78}$)	Índice de Comportamiento de flujo (n) (adim)
3,1709	0,2202

En cuanto a las dimensiones del sistema, las mismas siguen el diseño estándar en tanques agitados descritos por [3] y [27] y se reseñan (en mm) en la Figura 5.

Por otro lado, debido a la ausencia de intervalos teóricos y solo como una primera estimación para el cálculo, la determinación de las velocidades de agitación del sistema propuesto en cada etapa de la formulación se toma como la resultante de emplear la metodología de escalamiento dada por [19] a partir de las velocidades del modelo a escala, tomando como parámetro a mantener constante la potencia por unidad de volumen (P/V).

Es indudable que ambos sistemas (propuesto y modelo a escala) difieren tanto en las características de la agitación como en la geometría del tanque

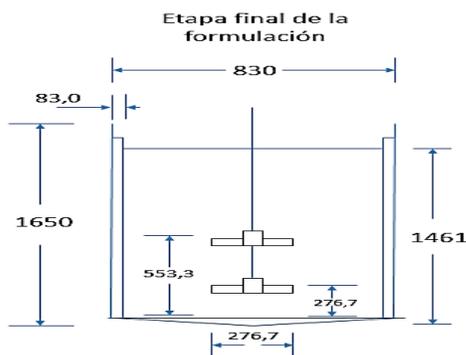
pudiendo presentarse cierta sobreestimación en los valores dados de velocidad, debido a la mayor eficiencia que las dos turbinas tipo Rushton presentadas en la propuesta tienen frente al impelente tipo Hélice del sistema a escala durante su operación [3].

de rotación presentada en la etapa crítica antes definida.

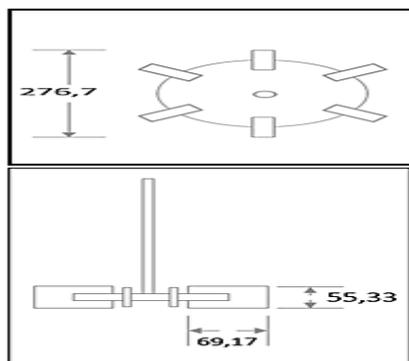
Tabla 15: Valores de velocidad de agitación estimadas a partir de criterios de escalamiento del modelo a escala

Velocidad de agitación determinada en el modelo a escala (rpm)	Velocidad de agitación estimada la propuesta de diseño (rpm)
600	108
1000	180
1500	270

Parámetro a mantener constante entre modelo y prototipo: P/V



(a) Tanques de elaboración de protector solar



(b) Impelente

Figura 5: Dimensiones (en mm) de la propuesta de acondicionamiento

A pesar de que lo anterior podría contribuir a la obtención de mejores resultados (en término de reducción y distribución de las gotas de la fase interna y de los filtros inorgánicos), junto a la posibilidad a futuro de preparar una gama más amplia de productos emulsionados, se recomienda una validación del parámetro durante las pruebas industriales de instalarse los cambios sugeridos.

Se presentan así en la Tabla 15, los valores de velocidad equivalente en el sistema propuesto para cada velocidad empleada en el modelo a escala. Para el cálculo de la potencia se tomó la velocidad

Finalmente, es calculado el número de Reynolds para fluidos no newtonianos [27] y empleando gráficos que correlacionan el mismo a la potencia de esta clase de impelente [3] es estimada la potencia del conjunto moto reductor igual a $(1,86 \pm 0,02)$ hp que considerando las capacidades estándar de los motores reseñados por [3] puede redondearse a 2 hp siendo mayor a los disponibles actualmente (de 1,5 hp), por ende debe evaluarse su respectiva adquisición junto a los demás elementos del sistema de agitación para ambos tanques.

3.4.3. Dosificación del producto elaborado

A fin de optimizar la etapa de trasiego del protector solar de la etapa de formulación a la de envasado, se propondrá la transferencia de los lotes elaborados en los tanques de formulación a la tolva de la llenadora a través de una bomba (operación realizada de forma manual actualmente en los productos de cuidado capilar).

El tipo de bomba empleada debe de garantizar la dosificación de un producto de viscosidad aparente media como el protector solar, evitando en la medida de lo posible el someterlo a cizallamientos elevados (altas velocidades) para garantizar que la emulsión no se rompa [27].

Ambas condiciones, en especial la última, hacen poco factible el empleo de tecnologías de bombeo convencionales (centrífugas) y surgen como alternativa las bombas de desplazamiento positivo, siendo particularmente deseables en esta clase de productos las bombas de diafragma neumáticas de doble efecto [22].

En virtud de evitar desbordes, debido a la baja capacidad de la tolva de la llenadora, son necesarios

caudales bajos. Para casos similares, se sugiere alrededor de 20 L/min [30], el cual se tomó como valor de diseño.

Atendiendo a que algunos fabricantes presentan las curvas características de esta clase de bomba en términos de carga dinámica (a fin de estimar, considerando el caudal de operación, las necesidades de aire comprimido en términos de presión y velocidad empleada) la misma fue calculada para el sistema propuesto.

En este punto se resalta el carácter estimativo del cálculo en atención a que varias condiciones para la aplicación del balance general de energía no son cumplidos, en particular: la viscosidad constante del fluido, estado estacionario durante la operación y la condición isotérmica del producto.

En cuanto a la viscosidad, se consideró el valor medido a $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 10 rpm del viscosímetro (2400 cp) como máximo a permanecer constante, se espera que este disminuya considerablemente durante la deformación de la crema dada por la bomba, en cuanto a la densidad se da como el valor reportado al calcular las propiedades fisicoquímicas.

Considerando que la bomba deberá impulsar el fluido mientras el nivel del mismo disminuye se tomó una altura mínima de 0,25 m, como condición límite en la cual la bomba requerirá la mayor carga dinámica.

Bajo todas estas consideraciones, se calculó mediante balance de energía del sistema (Figura 6) la carga dinámica que debe cumplir la bomba sugerida presentando un valor de $(5,4 \pm 0,8)$ m.

4. Conclusiones

La formulación del protector solar se completó con la elección del activo orgánico octinoxato (etilhexil p-metoxicinamato) y mediante un diseño experimental de mezcla tomando como base las proporciones de este y el segundo principio activo (dióxido de titanio) se generaron 5 propuestas para el producto.

Por su parte, las condiciones necesarias a escala de laboratorio fueron: una temperatura inicial de agua de proceso de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una velocidad de

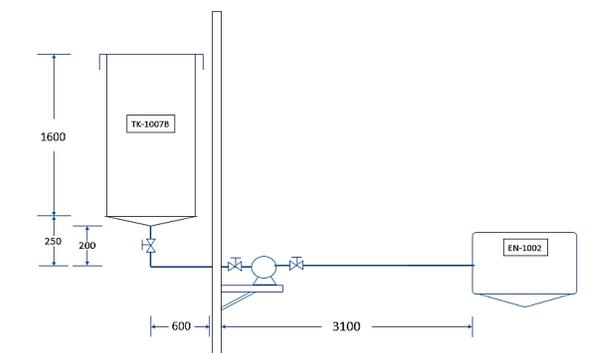


Figura 6: Diagrama con medidas (en mm) del sistema de dosificación propuesto para la producción de protector solar (Vista lateral)

agitación en incremento de acuerdo al ingrediente dosificado con un máximo de 1500 rpm.

Respecto a la evaluación de las características, las propiedades fisicoquímicas estuvieron dentro de los intervalos teóricos y la actividad fotoprotectora *in vitro* de las formulaciones se dio una tendencia al aumento junto con una mayor dosis del activo orgánico. De la misma forma, la formulación elegida fue comparada con un producto de la competencia superándolo por 1 unidad en este parámetro (FPS).

Por otra parte, en el diseño a nivel industrial las modificaciones sugeridas se basaron en: aumentar la capacidad de dosificación de agua caliente considerando la inclusión de 2 calentadores de agua eléctricos idénticos a los presentes en la actualidad, un cambio en el sistema de agitación siguiendo las proporciones estándar al igual que una sustitución de los agitadores dispuestos por unos de tipo Rushton de seis palas junto a un sistemas de baffles y motores de mayor potencia en ambos tanques de formulación presentes en la línea, finalmente, para el sistema de trasiego del producto a la etapa de envasado fue sugerida una bomba de desplazamiento positivo, neumática de doble diafragma.

5. Referencias

- [1] J. Wilkinson y R. Moore, *Cosmetología de Harry*, 1st ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A, 1990.
- [2] T. Santana, M. Robles, C. Aparecida, T. Kaneko, y A. Rolim, "Protección contra la radiación ultravioleta:

- recursos actuales disponibles en fotoprotección,” *Anais Brasileiros de Dermatologia*, vol. 86, no. 4, pp. 732–742, 2011.
- [3] A. Pérez, “Factibilidad técnico-económica de una planta productora de una crema cosmética a partir del aceite de la semilla del neem (*Azadirachta Indica*),” Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2003.
- [4] V. Mujica, M. Delgado, M. Ramírez, I. Velásquez, C. Pérez, y M. Rodríguez-Corella, “Formulación de un producto cosmético con propiedades antiarrugas a partir del aceite de semilla de merey (*anacardium occidentale l*),” *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V*, vol. 25, no. 2, pp. 119–131, 2010.
- [5] J. Salager, *Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su Medición*. Mérida, Venezuela: Editorial de la Universidad de los Andes, 1994.
- [6] D. Espinosa, “Diseño de proceso y equipos para la fabricación de cremas cosméticas,” Trabajo especial de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, 2004.
- [7] L. Palencia, “Estandarización del pH en la manufactura de formulaciones de emulsiones cosméticas con hidróxido de sodio,” Trabajo especial de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008.
- [8] E. Berbel, R. Kiatkoski, M. Correa, and L. Aparecida, “Inorganic UV filters,” *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 49, no. 2, pp. 201–209, 2013.
- [9] R. López, “Guía para el uso y elección de protectores solares y componentes para la industria cosmética y consumidores finales,” Tesis para obtener el título de Química Farmacéutico Biológica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [10] H. Lim and Z. Draelos, *Clinical Guide to Sunscreens and Photoprotection*. New York: Informa Healthcare, 2009.
- [11] A. Rahman, T. Pedzinski, and M. Shahid, “Photostability and photo-sensitizing characterization of selected sunscreens ingredients,” *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*, vol. 332, pp. 241–250, 2017.
- [12] E. Abreu, A. G. da Costa, E. Kedor-Hackmann, y M. Rocha, “Determinación del factor de protección solar (SPF) de los protectores solares mediante espectrofotometría ultravioleta,” *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 40, pp. 381–385, 2004.
- [13] J. Moreno, “El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) Fundamentos, Metodología y Aplicaciones,” *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, no. 1, pp. 28–77, 2002.
- [14] Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, *Guía de Estabilidad de Productos Cosméticos*. Brasilia, Brasil: Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (ANVISA), 2005.
- [15] N. Halla, I. Fernandes, S. Heleno, P. Costa, Z. Boucherit-Otmani, K. Boucherit, and M. Barreiro, “Cosmetics Preservation: A Review on Present Strategies,” *Molecules*, vol. 23, no. 7, pp. 1–41, 2018.
- [16] R. Sayre, P. Agin, G. Levee, and E. Marlowe, “A comparison of in vivo and in vitro testing of sunscreens formulas,” *Photochem y Photobiol*, vol. 29, no. 3, pp. 559–566, 1979.
- [17] G. Chavez, L. Gabriel, L. Kobayashi, A. Qwisgaard, E. Shimabukuro, and A. Sugahara, “Comparison of the photoprotective effects of sunscreens using spectrophotometric measurements or the survivability of yeast cells exposed to UV radiation,” *Revista de la Sociedad Química Perú*, vol. 8, no. 3, pp. 294–306, 2017.
- [18] E. Paul, V. Atiemo-Obeng, and S. Kresta, *Handbook of Industrial Mixing Science and Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] C. Geankoplis, *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México: Continental, 1998.
- [20] Norma COVENIN 676–74, *Pinturas diluibles con agua. Determinación del valor de pH (Potencial Hidrógeno)*, Comisión Venezolana de Normas Industriales, Caracas, Venezuela, 1974.
- [21] Norma Venezolana Covenin 1830-91, *Especificaciones e Instrucciones de Operación para Viscosímetros Cinemáticos Capilares de Vidrio*, 1st ed., PDVSA – Covenin, Caracas, Venezuela, 1991.
- [22] R. Mott, *Mecánica de Fluidos*, 6th ed. México: Pearson Educación, 2006.
- [23] Vigon International, Inc., “Safety Data Sheet (SDS) Benzophenone-3,” Vigon, Stroudsburg, Pensilvania, Tech report, 2020.
- [24] SpectrumChemical, “Safety Data Sheet (SDS) Octocrylene,” SpectrumChemical, Stroudsburg, Pensilvania, Tech report, 2017.
- [25] SpectrumChemical, “Safety Data Sheet (SDS) Octyl Methoxycinnamate,” SpectrumChemical, Stroudsburg, Pensilvania, Tech report, 2017.
- [26] S. Walas, *Chemical Process Equipment*. Washington: Butterworth-Heinemann, 1988.
- [27] W. McCabe, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, 7th ed. México: McGraw-Hill, 2007.
- [28] CORQUIVEN, “Hoja de Seguridad (MSDS) Ácido Esteárico,” Corporación Química Venezolana, CORQUIVEN, Venezuela, Informe técnico, 2000.
- [29] CORQUIVEN, “Hoja de Seguridad (MSDS) Alcohol Cetílico,” Corporación Química Venezolana, CORQUIVEN, Venezuela, Informe técnico, 2007.
- [30] A. Menéndez, “Modelado numérico de bombas volumétricas de diafragma,” Programa de Doctorado en Ingeniería Energética, Universidad de Oviedo, España, 2017.