

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

---

---

Facultad de Ingeniería

OBTENCIÓN DE NANOCÁPSULAS A BASE DE  
PARAFINA Y ESTIRENO PARA SU APLICACIÓN EN  
TEXTILES INTELIGENTES

**TESIS**

Para obtener el grado de:  
**INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA**

**PRESENTA:**

Eduardo Salinas Botello

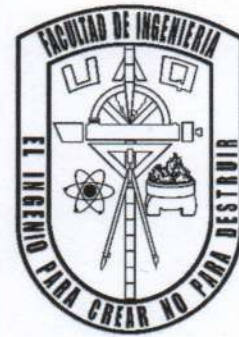
**DIRECTOR DE TESIS**

Dra. Karen Esquivel Escalante

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Licenciatura en Ingeniería en Nanotecnología



OBTENCIÓN DE NANOCÁPSULAS A BASE DE PARAFINA Y ESTIRENO PARA SU  
APLICACIÓN EN TEXTILES INTELIGENTES.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

PRESENTA:

Eduardo Salinas Botello

DIRIGIDO POR:

Dra. Karen Esquivel Escalante

SINODALES:

Dra. Karen Esquivel Escalante  
Presidente

Dr. Rodrigo Rafael Velázquez Castillo  
Secretario

M.C. Brenda Alicia Rosales Pérez  
Vocal

M.C. Luis Alejandro Martínez Chávez  
Sinodal

Four horizontal lines representing the signatures of the Sinodales. The first line has a signature, the second line has a signature, the third line has a signature, and the fourth line has a signature.

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Qro.  
Febrero 2022

## Dedicatorias.

A mis padres, porque gracias a ustedes soy quien soy. Es un privilegio ser su hijo y espero estén tan orgullosos de mí, como yo lo estoy de ustedes.

A mi demás familia, amigos, profesores y a todas las personas que han formado parte de mi vida y que me han apoyado en algún momento de ella.

## Agradecimientos.

Primeramente, agradezco a mis papás, Adán Salinas Cervantes y María Graciela Botello Crespo, por todo su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida; porque gracias a ellos y a su dedicación he logrado llegar hasta este punto de mi formación y he sido inmensamente feliz en el proceso.

También agradezco a todos los profesores que fueron parte de mi desarrollo académico, gracias por compartir una parte de su conocimiento conmigo, sin duda nada de esto sería posible sin ustedes.

De igual manera, agradezco a mi asesora de tesis, la Dra. Karen Esquivel Escalante. Gracias por haber creído en mí, por darme la oportunidad de trabajar con usted, por su asesoramiento y por el tiempo y dedicación que le puso a este proyecto.

Agradezco a todos mis amigos de esta y otras etapas de mi vida, pero especialmente a Dulce Deyanira y a José Antonio Mata por su amistad, apoyo, y por ser mis compañeros de aventuras durante nuestra etapa universitaria.

Finalmente agradezco a mis sinodales por haberme dado su guía y retroalimentación para terminar este trabajo en tiempo y forma.

## Índice.

Índice.....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Marco teórico y antecedentes.....</b>	<b>3</b>
2.1. Textiles .....	4
2.2. Fibra de algodón.....	4
2.3. Textiles inteligentes .....	5
2.4. Tipos de textiles inteligentes .....	6
2.4.1. E-textiles.....	6
2.4.2. Textiles fotónicos.....	6
2.4.3. Textiles plasmónicos.....	7
2.4.4. Textiles sensibles a los estímulos (SRP) .....	7
2.4.5. Textiles médicos .....	7
2.4.6. Textiles de protección .....	7
2.4.7. Textiles termorregulados .....	7
2.5. Materiales de cambio de fase (PCM) .....	8
2.5.1. Ceras parafínicas.....	9
2.1. Encapsulación de un PCM.....	9
2.1. Métodos de encapsulación.....	11
2.1.1. Coacervación.....	12
2.1.2. Polimerización interfacial.....	12
2.1.3. Polimerización in situ.....	12
2.2. Técnicas para la aplicación de las nanocápsulas en un sustrato textil.....	13
2.2.1. Métodos convencionales .....	13
2.2.2. Laminado y recubrimientos .....	13
<b>Capítulo 3. Descripción del problema .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 4. Justificación .....</b>	<b>17</b>

<b>Capítulo 5. Planteamiento teórico .....</b>	<b>20</b>
5.1. Hipótesis .....	21
5.2. Objetivo general .....	21
5.3. Objetivos particulares .....	21
<b>Capítulo 6. Desarrollo experimental y técnicas utilizadas .....</b>	<b>22</b>
6.1. Síntesis de las nanocápsulas .....	23
6.1.1. Síntesis con agitación mecánica .....	23
6.1.1. Síntesis con baño sónico .....	23
6.1.2. Síntesis con sonotrodo .....	24
6.2. Caracterizaciones fisicoquímicas .....	24
6.3. Incorporación de las nanocápsulas de St@PW a un textil de algodón .....	25
6.4. Evaluación del efecto termorregulador .....	25
6.5. Prueba de lavado acelerado .....	26
<b>Capítulo 7. Resultados y discusión .....</b>	<b>27</b>
7.1. Síntesis y caracterización de nanocápsulas (St@PW) .....	28
<b>Capítulo 8. Conclusiones.....</b>	<b>39</b>
<b>Capítulo 9. Perspectivas a futuro .....</b>	<b>42</b>
<b>Capítulo 10. Anexos .....</b>	<b>44</b>
10.1. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) .....	45
10.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) .....	46
10.3. Análisis de termogravimetría (TGA) .....	47
<b>Referencias.....</b>	<b>49</b>

## Índice de figuras.

Figura 2. Diferentes morfologías de micro/nanocápsulas (Ghosh, 2006). .....	11
Figura 1. Valor del mercado de textiles inteligentes para 2025 de acuerdo con las previsiones compiladas de varias fuentes (Statista Research Department, 2020).....	18
Figura 3. Esquema del diseño experimental para la síntesis de las nanocápsulas St@PW.....	24
Figura 4. Diagrama del circuito utilizado para evaluar el efecto de termorregulación de los textiles.....	26
Figura 5. Material obtenido de cada síntesis realizada: a) con agitación mecánica, b) con baño-sónico y c) con sonotrodo.....	28
Figura 6. Micrografías de los diferentes materiales sintetizados: a) St@PW-mecánica 250 X, b) St@PW-mecánica 1000 X, c) St@PW-bañosónico 500 X, d) St@PW-bañosónico 1000 X, e) St@PW-sonotrodo 250 X y f) St@PW-sonotrodo 1000 X.....	29
Figura 7. Estructura molecular de: a) parafina (Floros, 2016) y b) poliestireno (Findlay, 2018). ....	30
Figura 8. Espectros FTIR de 600 a 4000 cm <sup>-1</sup> de los materiales ST@PW sintetizados, así como de la parafina y del estireno.....	30
Figura 9. Espectro FTIR para un mayor detalle de la vibración del enlace C-H alifático de la parafina. ....	31
Figura 10. Análisis termogravimétrico de los materiales sintetizados y de la parafina: a) parafina, b) St@PW-mecánica, c) St@PW-bañosónico y d) St@PW-sonotrodo. ....	32
Figura 11. Textiles termorregulados generados: a) mecánica-50%, b) bañosónico-50%, c) sonotrodo-50%, d) mecánica-100%, e) bañosónico-100% y f) sonotrodo-100%.....	33
Figura 12. Comparación entre un textil termorregulado generado (derecha) y un textil 100% algodón (izquierda). ....	33
<i>Figura 13. Evaluación del efecto termorregulador de los textiles generados. ....</i>	34
Figura 14. Evaluación del efecto de termorregulación de los textiles generados antes y después del lavado acelerado; a) mecánica-50%, b) bañosónico-50%, c) sonotrodo-50%, d) mecánica-100%, e) bañosónico-100% y f) sonotrodo-100%.....	37

Figura 15. Textil termorregulado antes (izquierda) y después del lavado  
acelerado (derecha). .....38

Figura S 1. Diagrama de los componentes de un SEM. ....45



## Índice de tablas.

Tabla 1. Composición aproximada del algodón en crudo (Borrero, 1979). .....	4
Tabla 2. Puntos de fusión y calores latentes de fusión de la parafina en función al número de átomos de carbón (Sharma et al., 2009). ....	10
Tabla 3. Métodos de micro/nanoencapsulación desarrollados (Ghosh, 2006). ....	12
Tabla 4. Reactivos y cantidades usadas para la síntesis de St@PW. ....	23
Tabla 5. Cantidades y muestras para realizar la incorporación de las nanocápsulas al sustrato textil.....	25
Tabla 6. Valores de la diferencia de temperatura entre un textil termorregulado y uno convencional a los 0, 10, 20 y 30 minutos.....	35
Tabla 7. Valores de la diferencia de temperatura entre un textil termorregulado y uno convencional después de un proceso de lavado acelerado a los 0, 10, 20 y 30min. ....	36
Tabla 8. Peso antes y después de un lavado acelerado de los textiles generados. ....	38

---

## Resumen.

Los textiles son fundamentales en la vida cotidiana de las personas y es por lo que cada año la demanda de fibras textiles aumenta. Sin embargo, no solo aumenta la demanda de dichas fibras, sino que, también se pide que las prendas, y materiales con los que se fabrican, sean cada vez más funcionales e inteligentes; dando como resultado el aumento en el interés por desarrollar textiles que sean capaces de pensar y reaccionar a los cambios del medio en el que se encuentran, y esto es lo que se conoce como un textil inteligente.

Por lo anterior, en este trabajo, se presenta el desarrollo de la síntesis y caracterización de microcápsulas a base de parafina y estireno (St@PW) mediante polimerización *in situ*, variando el tipo de agitación utilizada entre mecánica, baño sónico y sonotrodo; para su aplicación en textiles termorregulados, las cápsulas se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y termogravimetría (TGA). Las microcápsulas obtenidas se incorporaron a un sustrato textil, 100 % de algodón, mediante el método de rasqueteado y los nuevos textiles generados fueron evaluados térmicamente mediante un microcontrolador y un circuito para comparar su diferencia de temperatura respecto a un textil sin modificar; por último, dichos textiles fueron sometidos a una prueba de lavado acelerado para evaluar su durabilidad y para ver como este proceso afectaba la termorregulación de la prenda.

Los resultados del SEM, de los materiales sintetizados, mostraron que se obtuvieron materiales principalmente amorfos, pero en los que se podían encontrar cápsulas de aproximadamente 50µm con una morfología esférica. Mediante FTIR se puede deducir que no hubo un 100 % de encapsulación de la parafina, pues su espectro se sobrepone al del estireno y por TGA se puede ver que los materiales son estables térmicamente hasta los 150 °C, que es donde se presenta la evaporación de la parafina, lo que supone una pérdida de entre 50 y 70 % del peso del material. No obstante, en la evaluación térmica de los textiles generados, se observa que dichos textiles presentan una diferencia de temperatura superior de hasta 4 °C respecto a un textil convencional, lo cual sugiere que la parafina es un gran candidato como material de cambio de fase (PCM) para este tipo de aplicaciones.

---

## Abstract

Textiles are essential in people's daily lives, which is why the demand for textile fibers increases year after year. However, not only the demand for these fibers increases, but also the demand for garments and the materials with which they are made, are increasingly functional and intelligent, resulting in an increased interest in developing textiles that are capable of sensing and reacting to changes in the environment in which they are found, and this is what is known as an intelligent textile.

Therefore, in the present work, we present the development of the synthesis and characterization of kerosene and styrene-based microcapsules (St@PW) by in situ polymerization, varying the type of agitation used between mechanical, sonic bath and sonotrode; for its application in thermoregulated textiles, the capsules were characterized by scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetry (TGA). The microcapsules obtained were incorporated into a textile substrate, 100% cotton, by the scratching method and the new textiles generated were thermally evaluated using a microcontroller and a circuit to compare their temperature difference with respect to an unmodified textile; finally, these textiles were subjected to an accelerated washing test to evaluate their durability and to see how this process affected the thermoregulation of the garment.

The SEM results of the synthesized materials showed that amorphous materials were obtained, but in which microcapsules of approximately 50 $\mu$ m with a spherical morphology could be found. By FTIR it can be deduced that there was not 100% encapsulation of the kerosene, since its spectrum overlaps that of styrene and by TGA it can be observed that the materials are thermally stable up to 150°C, which is where evaporation of the kerosene occurs, resulting in a loss of between 50 and 70% of the weight of the material. However, in the thermal evaluation of the textiles generated, it is observed that all the textiles generated present a temperature difference up to 4°C higher than that of a conventional textile, which leads us to believe that kerosene is a great candidate as a phase change material (PCM) for this type of application.

Capítulo 1. Introducción

La nanociencia y la nanotecnología se refieren al estudio, manipulación, ingeniería y aplicación de materia, partículas y estructuras en la escala nanométrica ( $1\text{nm} = 1 \times 10^{-9}\text{ m}$ ) y según algunas instituciones como la “British Standards Institution” o la “Internacional Organization for Standardization”, los nanomateriales están definidos por un rango de tamaño de entre 1 y 100nm en al menos una de las dimensiones (Mishra & Militky, 2019) .

La nanotecnología se puede utilizar para darle a los textiles ciertos atributos como la suavidad, la durabilidad y la transpirabilidad de la tela, y en el desarrollo de características de rendimiento avanzadas, tales como la repelencia al agua, retardo de ignición, resistencia antimicrobiana o confort térmico por mencionar algunas. Y aunque la industria textil es una pequeña parte de la investigación mundial en las áreas emergentes de la nanotecnología, las industrias de fibras y textiles fueron, de hecho, las primeras en implementar con éxito estos avances y demostrar las aplicaciones de la nanotecnología para el uso del consumidor (Nasif Chowdhury & Subrata Chandra Das, 2015).

El trabajo principal sobre nanotecnología en textiles fue iniciado por Nano-Tex, un colaborador de “Burlington Industries”, con sede en los Estados Unidos de América y posteriormente, otras empresas textiles alrededor del mundo comenzaron a invertir para el desarrollo de nanotecnologías en diversos aspectos, siendo el recubrimiento una de las técnicas más comunes para aplicar nanopartículas sobre textiles (Hosne Asif & Hasan, 2018).

Existen diferentes métodos para aplicar los recubrimientos sobre telas, incluyendo rociado, impresión por transferencia, lavado, enjuague y rasqueteado. De estos métodos, el rasqueteado o relleno es el más utilizado, en dicho método las nanopartículas se adhieren a los tejidos con el uso de una resina seguido de un proceso de secado y curado (Mishra & Militky, 2019).

Capítulo 2. Marco teórico y antecedentes

## 2.1. Textiles

Es bien sabido que los textiles y la vestimenta son una parte primordial en la vida cotidiana de las personas a nivel global, esto se refleja en que, tan solo en 2017, la demanda mundial de telas se estimó en 93.9 millones de toneladas y las proyecciones a largo plazo sugieren que el consumo mundial de fibras textiles podría crecer a una tasa anual promedio del 3.2 % para alcanzar cerca de 119.2 millones de toneladas en 2025 (Buryaile et al., 2017).

Ahora bien, dentro de estas fibras textiles, hay diferentes tipos y se dividen en dos grandes grupos: fibras naturales y fibras artificiales. Y si bien existen diferentes tipos de fibras, el algodón es la fibra textil con mayor consumo a nivel mundial, pues su uso representa el 39 % en peso del total de fibras utilizadas, le siguen las fibras sintéticas con otro 39 %, las fibras artificiales con 10 %, la lana con 5 % y el 7 % restante corresponde a las demás fibras existentes: lino, cáñamo, seda, sisal o yute, por mencionar algunas (Serna, 2010).

Y este aumento en la demanda se debe a la expansión económica de los países en vías de desarrollo, ya que el consumo en estos países representa el 78 % de la demanda adicional a nivel mundial, tan solo en Latinoamérica este mercado creció en un 2.1 % (Buryaile et al., 2017).

## 2.2. Fibra de algodón

El algodón es un arbusto de entre 0.7 y 2.5 metros de altura, dicho arbusto proporciona una hebra elemental en forma de cinta con una longitud de entre 1 y 5 centímetros y un grueso de entre 12 y 28 micras (Borrero, 1979).

La fibra de algodón tiene una composición que se muestra en la Tabla 1, y como se puede observar, es principalmente celulosa, por lo que las propiedades de del algodón están dadas por este componente.

*Tabla 1. Composición aproximada del algodón en crudo (Borrero, 1979).*

Componente	Porcentaje en peso
Celulosa	85.5 %
Aceite y cera	0.5 %
Proteínas, pectosa y colorantes	5.0 %
Minerales	1.0 %
Humedad	8.0 %

Debido a su composición y estructura, el tejido puede retener hasta el 50 % de su peso en agua y no es estable conservando su forma, por este motivo se somete a un proceso de sanforizado, el cual consiste en una elongación previa mediante la aplicación de temperatura, presión y humedad (Serna, 2010).

### 2.3. Textiles inteligentes

Los textiles tradicionales (por ejemplo, tejidos de algodón, hilos de lana, etc.), que son altamente usados, son altamente funcionales, es decir, proporcionan calidez, suavidad o confort, por mencionar algunos de sus beneficios, pero no son capaces de detectar, reaccionar o adaptarse a estímulos externos, como los son la radiación solar o los cambios bruscos y extremos de temperatura (Xiaopei Wu & Li, 2019).

Por su parte, los textiles inteligentes son capaces de sentir los cambios ambientales y reaccionar ante ellos mediante la integración de funcionalidades especiales en la estructura. Los textiles inteligentes son generalmente prendas de vestir, calzado o accesorios que integran materiales que ayudan a detectar, reaccionar o adoptar a las condiciones ambientales cambiantes como el pH, la temperatura, la radiación electromagnética o el tacto (Joshi & Adak, 2019)(Das et al., 2013).

Los textiles inteligentes se pueden clasificar en dos grandes grupos (Sarif Ullah Patwary, 2015):

- **Textiles inteligentes pasivos:** solo detectan las condiciones ambientales o estímulos específicos (sensores).
- **Textiles inteligentes activos:** detectan y reaccionan a los estímulos del medio ambiente.

Además, si un textil inteligente tiene la capacidad de sentir, reaccionar y adaptarse en función de la experiencia aprendida de lo que sintió y reaccionó anteriormente, entonces califica como un textil "muy inteligente" (Xiaopei Wu & Li, 2019).

Asimismo, los textiles inteligentes presentan diferentes grados de integración. Esto se refiere a la medida en que el componente/material/sustancia que realiza la función "inteligente" está incrustado en el textil por lo que dichos textiles se pueden clasificar en tres generaciones: primera, segunda y tercera generación (Hughes-Riley et al., 2018). Si bien esta clasificación se usa para textiles electrónicos, bien podría utilizarse para textiles inteligentes.

- **Primera generación:** el componente/material/sustancia que da la función "inteligente" se aplica o se adhiere a la superficie del textil; esta generación es típicamente más rígida y voluminosa.
- **Segunda generación:** el componente/material/sustancia que otorga la función "inteligente" se integra en la estructura textil, por ejemplo, en el tejido o hilos de una prenda. Esta generación de textiles inteligentes es típicamente más flexible, pero todavía tiende a carecer de comodidad y versatilidad.



- **Tercera generación:** el componente/material/sustancia que otorga la función "inteligente" es capaz de existir mucho más discretamente dentro de un diseño textil sin interferir con sus cualidades estéticas y de confort.

La nanotecnología permite la incorporación de elementos que hace a los textiles cotidianos más inteligentes y gracias a esto, este tipo de textiles se están volviendo más eficientes y funcionales por lo que ya se usan ampliamente en diversas aplicaciones técnicas de alto rendimiento, tales como textiles protectores, textiles automotrices, textiles médicos y textiles deportivos (Koncar, 2016)(Matsuo, 2008).

## 2.4. Tipos de textiles inteligentes

Antes de hablar de los diferentes tipos de textiles inteligentes, primero hay que definir un concepto que está estrechamente relacionado con los textiles inteligentes: las computadoras vestibles (wearable computer en inglés) (Schneegass & Amft, 2017).

Una computadora vestible es un dispositivo electrónico que está estrechamente conectado con el usuario, lo cual hace que sea un sistema de procesamiento de datos adjunto al cuerpo, con uno o más dispositivos de salida, donde la salida es perceptible constantemente a pesar de la tarea particular o la posición del cuerpo, y un medio de entrada que permite modificar la funcionalidad del sistema de procesamiento de datos (Schneegass & Amft, 2017).

Debido a lo anterior podemos decir que este tipo de dispositivos no hacen parte de los textiles inteligentes pues no integran un material en la estructura textil, sino que integran un dispositivo electrónico para hacerlo más fácil de transportar (Xiaopei Wu & Li, 2019).

Ahora bien, entre los tipos de textiles inteligentes más comunes están:

### 2.4.1. E-textiles

Este tipo de textiles es una "evolución" de los dispositivos vestibles ya que los componentes electrónicos convencionales son voluminosos y en su mayoría rígidos, por lo que en los e-textiles se incorporan películas conductoras o sustratos textiles para conseguir prendas con dispositivos inteligentes, pero sin perder la flexibilidad. Además de la flexibilidad, también se pueden obtener otras funcionalidades electrónicas mediante la incorporación de nanomateriales y nanofibras (Joshi & Adak, 2019).

### 2.4.2. Textiles fotónicos

Los textiles fotónicos o textiles emisores de luz son aquellos que presentan una respuesta visual. En los textiles fotónicos, los diodos emisores de luz (LED), las fibras ópticas poliméricas (POF), las fibras recubiertas de polímeros fotoluminiscentes, los hilos recubiertos de tinta/colorante termocrómico o los sensores se integran directamente en las estructuras textiles para cambiar su apariencia cambiando los colores, la frecuencia de

emisión y patrones de luz emitida (Tan, 2015). Por lo tanto, los textiles fotónicos son una solución económica para diversas aplicaciones, como telas interactivas, señalización, sensores (por ejemplo, temperatura, presión, humedad, tensión), arte y también para los textiles inteligentes utilizados en el monitoreo de partes del cuerpo (Quandt et al., 2017).

#### **2.4.3. Textiles plasmónicos**

La resonancia de plasmón de superficie (SPR por sus siglas en inglés) se ha estudiado intensamente para ser utilizada en diferentes sensores, por lo tanto, los textiles plasmónicos son aquellos en los que se integra un sensor basado en un plasmón de resonancia, la naturaleza y tipo de sensor pueden variar, pero la idea es la misma (Joshi & Adak, 2019).

#### **2.4.4. Textiles sensibles a los estímulos (SRP)**

Los polímeros sensibles a estímulos son materiales inteligentes que pueden mostrar cambios notables en sus propiedades con la variación de los estímulos ambientales; este tipo de materiales incluyen polímeros sensibles a la temperatura, polímeros sensibles a la humedad, hidrogeles sensibles al calor, hidrogeles sensibles al pH y polímeros sensibles a la luz y al integrarlos a un textil se obtienen funcionalidades que incluyen atractivo estético, comodidad, pantalla suave textil, liberación controlada inteligente de medicamentos, diseño de fantasía con cambio de color, monitoreo de heridas, propiedades de humectación inteligente y protección contra variaciones extremas en las condiciones ambientales entre otras (Hu et al., 2012).

#### **2.4.5. Textiles médicos**

Como su nombre lo indica, son textiles inteligentes con aplicaciones en el área médica, siendo los textiles con propiedades antimicrobianas y antibacterianas muy importantes pues se utilizan, por ejemplo, en uniformes de trabajadores, vestidos de pacientes, telas para vendajes, toallas, sábanas, abrigos o batas quirúrgicas, para mantener la salubridad, la higiene, la atención privada y para uso final quirúrgico adecuado. Pero también existen textiles con propiedades que permiten llevar a cabo funciones de alto impacto en la salud, como la liberación controlada de fármacos o el monitoreo de signos vitales (Pan & Sun, 2011).

#### **2.4.6. Textiles de protección**

Son aquellos que, mediante modificaciones en su estructura textil, pueden otorgar cierto grado de protección al usuario contra ataques físicos. Un ejemplo de esto son los textiles revestidos y laminados a base de nanocompuestos poliméricos que son candidatos atractivos para varias aplicaciones de alto rendimiento, incluida la ropa de defensa y protección (Joshi & Adak, 2019).

#### **2.4.7. Textiles termorregulados**

Un textil termorregulado es un textil inteligente capaz de detectar y adaptarse a la temperatura del medio en el que se encuentren, si la temperatura externa es fría, el textil brindara una sensación de calidez al usuario, y caso contrario, si la temperatura exterior es alta la prenda dará una sensación de frescor (Silva, 2009). Para lograr dicha propiedad termorreguladora en un textil convencional es necesario incluir un material que sea capaz de absorber o liberar calor en las condiciones adecuadas y un grupo de materiales que cumple con esta característica son los materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) (Khan & Nahid Pervez, 2015).

### **2.5. Materiales de cambio de fase (PCM)**

Los materiales de cambio de fase son aquellos que pueden cambiar de un estado físico (sólido, líquido o gaseoso) a otro estado físico sin un cambio significativo en la temperatura (Mondal, 2008) y durante este proceso, liberan o almacenan una gran cantidad de calor (Tao, 2015), lo cual, genera el efecto termorregulador deseado ya que, cuando se alcanza la temperatura de fusión durante un proceso de calentamiento, se produce un cambio de fase del estado sólido al líquido (Tang & Stylios, 2006).

Durante este proceso de fusión, el PCM absorbe una gran cantidad de calor latente del área circundante. Este calor se almacena en el material y posteriormente se libera en un proceso de enfriamiento que comienza a la temperatura de cristalización del PCM y durante todo el proceso de cambio de fase, su temperatura, así como el área próxima a éste, permanece constante y una vez completado el cambio de fase, el calentamiento/enfriamiento continuo produce un aumento/disminución adicional de la temperatura (Pause, 2003). Dicho cambio de fase es automático; por lo tanto, el efecto de regulación de la temperatura de los PCM también lo es y no requiere intervención externa (Meng et al., 2015).

Existen diferentes tipos de materiales de cambio de fase que pueden utilizarse en la industria textil, actualmente se conocen más de 500 de estos materiales, entre los que se encuentran (Mondal, 2008):

- Ceras parafínicas
- Sales hidratadas
- Polietilenglicol
- Ácidos grasos
- Hidrocarburos hidrofóbicos lineales de cadena larga
- Compuestos eutécticos (ya sean orgánicos o inorgánicos)

Y si bien existen varios materiales de cambio de fase, los cuales cuentan con diferentes capacidades para almacenar calor, estos deben cumplir ciertos requisitos para su uso en textiles, como lo son (Nagano et al., 2003):

- punto de fusión de entre 15 y 35 °C,
- alto calor de fusión,
- diferencia de temperatura entre sus puntos de cambio de fase acordes a la aplicación que se les va a dar,
- ser inofensivo para el medio ambiente,
- baja o nula toxicidad,
- estabilidad para la repetición de la fusión y la solidificación,
- buena conductividad térmica, para una efectiva transferencia de calor, y opcionalmente;
- facilidad de obtención y bajo costo.

Por lo tanto, al introducir este tipo de materiales a un textil convencional se pueden obtener los siguientes efectos térmicos en dicho textil (Pause, 2003):

- Un efecto refrescante.
- Una sensación de calidez.
- Un efecto de termorregulación, resultado tanto del efecto de absorción como del de emisión del PCM.

### **2.5.1. Ceras parafínicas**

Dentro de los muchos materiales de cambio de fase que existen, uno de los grupos que cumple los requisitos necesarios para ser aplicados en textiles son las ceras parafínicas. La cera de parafina consiste en una mezcla de n-alcanos en su mayoría de cadena lineal ( $\text{CH}_3\text{--}(\text{CH}_2)\text{--CH}_3$ ). La cristalización de la cadena ( $\text{CH}_3$ ) libera una gran cantidad de calor latente (Sharma et al., 2009). Es importante mencionar que tanto el punto de fusión como el calor latente de fusión de la cera de parafina aumentan con la longitud de la cadena y esto se traduce en que podemos obtener un amplio rango de temperaturas para su aplicación en textiles (He & Setterwall, 2002) y además son químicamente inertes y estables hasta los 500°C (Sharma et al., 2009). A continuación, en la Tabla 2, se muestran los diferentes puntos de fusión y de calor latente de fusión que podemos encontrar en las parafinas.

### **2.1. Encapsulación de un PCM**

La tecnología de microencapsulación se empezó a utilizar a principios de la década de 1980 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de EE. UU. con el objetivo de gestionar las propiedades de barrera térmica de las prendas, en particular para su uso en trajes espaciales. Se encapsularon materiales de cambio de fase (por ejemplo, n-decano) con la esperanza de reducir el impacto de las variaciones extremas de temperatura encontradas por los astronautas durante sus misiones en el espacio. Finalmente, la tecnología no se incluyó en el programa espacial, sin embargo, se reconoció el potencial de dicha tecnología (Nelson, 2013).

Tabla 2. Puntos de fusión y calores latentes de fusión de la parafina en función al número de átomos de carbón (Sharma et al., 2009).

Número de átomos de carbón	Punto de fusión (°C)	Calor latente de fusión (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

La encapsulación se define generalmente como el proceso de cubrir una sustancia (núcleo) con uno o varios materiales (cubierta) para producir capsulas, dichas cápsulas tienen diámetros entre una micra y unos pocos milímetros. Las microcápsulas cuyo diámetro está en el rango de nanómetros se denominan nanocápsulas (Preet Kaur et al., 2013). Estas partículas micro/nanométricas se benefician de la combinación de las propiedades de diferentes tipos de materiales orgánicos e inorgánicos (Ghayempour & Mortazavi, 2015).

El núcleo puede estar en forma de gas, líquido o sólido, formando así materiales encapsulados con diferentes formas esféricas, cilíndricas, tubulares, rectangulares o irregulares. Las micro/nanocápsulas pueden ser mononucleares que contienen la cubierta alrededor del núcleo, polinucleares con muchos núcleos encerrados dentro de la cubierta y las estructuras de la matriz, donde el material del núcleo se distribuye homogéneamente en el material de la cubierta (Montazer & Harifi, 2018). También se han reportado estructuras multipared o multinúcleo (ver Figura 1).

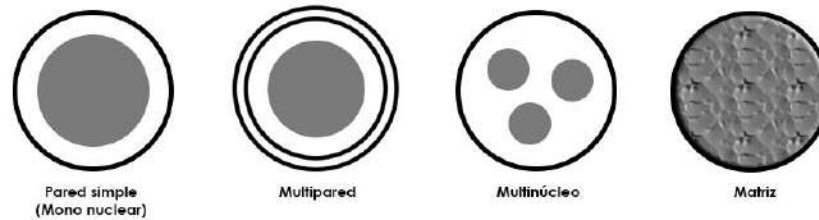


Figura 1. Diferentes morfologías de micro/nanocápsulas (Ghosh, 2006).

La mayoría de los PCM sólidos-líquidos, como lo pueden ser las parafinas, deben encapsularse para su uso; de lo contrario, el líquido se perderá durante los ciclos de aplicación. Sin embargo, los que son sólido-sólido, no necesitan ser encapsulados porque no se vuelven líquidos después del cambio de fase (Meng et al., 2015).

El tamaño de partícula del PCM debe adaptarse a la aplicación, ya que tanto el proceso de encapsulación como el tamaño éstas, afectan la temperatura de cambio de fase. Cuanto más grandes sean las partículas, más cercana está dicha temperatura a la del material a granel y dependiendo del proceso de encapsulación se pueden lograr tamaños más grandes o pequeños.

En contraste, cuanto más pequeñas son las partículas, mayor es la diferencia entre las temperaturas de fusión y congelación del PCM (Ghosh, 2006), siendo las partículas de menor tamaño las que nos brindan la oportunidad de fabricar materiales con una gran área de transferencia de calor, baja reactividad con el entorno y cambios de volumen controlados durante la transición de fases (Pielichowska & Pielichowski, 2014).

Existen diferentes técnicas de micro/nanoencapsulación y éstas se clasifican en dos grandes grupos, en función de qué tipo de método se usa en el proceso: métodos físicos o métodos químicos (Silva, 2009). La Tabla 3 muestra las técnicas de micro/nanoencapsulación más utilizadas (Nelson, 2013).

La selección de la técnica de encapsulación y el material del núcleo/carcasa depende de la aplicación final del producto, considerando la estabilidad física y química, la concentración, el tamaño de partícula requerido, el mecanismo de liberación y los costos de fabricación (Alvarez et al., 2017) (Casanova & Santos, 2016).

### 2.1. Métodos de encapsulación

Existen diferentes tipos de métodos para la obtención de micro y nanocápsulas entre los cuales se encuentran los siguientes:

Tabla 3. Métodos de micro/nanoencapsulación desarrollados (Ghosh, 2006).

Métodos físicos	Tamaño de partícula (µm)
Pulverización	5-5000
Lecho fluidizado y proceso Wurster	20-1500
Coextrusión	250-2500
Gelación	>75
Métodos químicos	Tamaño de partícula (µm)
Coacervación	0.1-5000
Polimerización interfacial	0.1-1100
Polimerización in situ	0.1-1000
Extracción-Evaporación del solvente	0.1-1000

### 2.1.1. Coacervación

La coacervación, o a veces llamada separación de fases, implica la separación de fases de uno o más hidrocoloides de la solución inicial y la posterior deposición de la fase coacervada recién formada alrededor del ingrediente activo suspendido o emulsionado en el mismo medio de reacción. Después de endurecerse, la pared de las microcápsulas forma una estructura reticulada; por tanto, las microcápsulas tienen buenas propiedades térmicas y de resistencia a la humedad y pueden usarse para aplicaciones de liberación controlada. La coacervación generalmente implica una serie de pasos, que se llevan a cabo bajo agitación continua (Nelson, 2013).

### 2.1.2. Polimerización interfacial

Se disuelve un monómero multifuncional en el material del núcleo y esta solución se dispersa en una fase acuosa. Se añade un reactivo al monómero a la fase acuosa y la polimerización se produce rápidamente en las superficies de las gotitas del núcleo, formando las paredes de la cápsula. La polimerización interfacial se puede utilizar para preparar microcápsulas más grandes, pero la mayoría de los procesos comerciales de polimerización interfacial producen cápsulas más pequeñas en el rango de diámetro de 20 a 30 micras, o incluso en el rango de diámetro de 3 a 6 micras (Nelson, 2013).

### 2.1.3. Polimerización in situ

La polimerización in situ es una técnica de encapsulación química muy similar a la polimerización interfacial. La característica distintiva de la polimerización in situ es que no se incluyen reactivos en el material del núcleo. Toda la polimerización ocurre en la fase continua, en lugar de en ambos lados de la interfaz como en la polimerización interfacial.

Típicamente, una fase oleosa (oil phase) se emulsiona en agua usando polímeros solubles en agua y surfactantes, produciendo una emulsión estable en el tamaño de gota requerido.

Durante el endurecimiento del material de la pared se forman las microcápsulas y se produce la dispersión acuosa de gotas de aceite encapsuladas en polímero (Nelson, 2013).

En esta método de síntesis, la velocidad de agitación es fundamental ya que de esto depende en gran medida el tamaño de las capsulas que se obtienen, por lo tanto, la velocidad de mezcla debe ser lo suficientemente alta como para proporcionar el corte tangencial requerido en la superficie de la membrana, pero no demasiado excesivo para inducir una mayor ruptura de las gotas, no obstante pueden usarse algunos otros métodos para generar dichas gotas, tales como el baño ultrasónico y la sonoquímica (L. Sánchez et al., 2008).

### **2.2. Técnicas para la aplicación de las nanocápsulas en un sustrato textil**

Las micro/nanocápsulas se pueden aplicar sobre cualquier tejido, el sustrato puede ser lana, seda, algodón, lino o fibras sintéticas como poliamida o poliéster, o mezclas. La mayoría de las microcápsulas se pueden aplicar utilizando técnicas de acabado convencionales sin alterar el tacto y el color de las telas (Ghosh, 2006).

#### **2.2.1. Métodos convencionales**

Para la fijación de partículas, el material textil se expone a una solución, dispersión o emulsión de las partículas reactivas con textiles mediante métodos convencionales tales como relleno, inmersión, pulverización, remojo o serigrafía. Para todos estos métodos, se requiere una carpeta la cual puede ser acrílico, poliuretano o silicona, y su función es fijar las microcápsulas al tejido y mantenerlas en su lugar durante el lavado. La fijación real tiene lugar durante la etapa de curado, después de la etapa de secado. El curado de la reticulación con textiles tiene lugar en condiciones de temperatura y velocidad precisas en una cámara de calor (Ghosh, 2006).

#### **2.2.2. Laminado y recubrimientos**

El objetivo de recubrir o laminar un sustrato textil con una capa de polímero es influir significativamente en sus características externas y propiedades físicas. Las tejas recubiertas con, o laminadas, unidas con una capa continua de polímero adquieren nuevas propiedades que no se pueden lograr con la tela base por sí sola (Ghosh, 2006).

Y dado que las aplicaciones de los textiles de cambio de fase incluyen indumentaria, mantas, campo médico, aislamiento, ropa protectora y muchos otros; actualmente existen o se están llevando a cabo diferentes trabajos e investigaciones en las diferentes áreas textiles. Chen y col. obtuvieron fibras ultrafinas de compuesto de PEG/acetato de celulosa en el que el PEG actúa como PCM mediante electrohilado (Chen et al., 2007). Koo y col. investigaron las propiedades térmicas y físicas de los recubrimientos impermeables en una tela de nylon



que contenía MEPCM como estabilizadores de temperatura (Koo et al., 2008). Shin y col. aplicaron microcápsulas que contenían n-octadecano y n-eicosano a telas de algodón teñidas con añil natural usando un método de impresión de pantalla de puntos (Shin et al., 2010). Salaün et al. desarrollaron tejidos textiles termorreguladores a base de poliuretano con microcápsulas de melamina-formaldehído que contenían una mezcla de n-alcanos (Salaün et al., 2010). Alkan et al. prepararon microcápsulas de poli(metacrilato de metilo) (PMMA)/n-hexadecano usando una polimerización en emulsión (Alay et al., 2011).

Aunado a lo anterior, que son estudios a nivel laboratorio, Silva M., llevo a cabo la obtención de microcápsulas a base de parafina y estireno/metacrilato en una planta piloto, con un reactor de 10 L, obteniendo resultados microcápsulas con un tamaño de 81.79  $\mu\text{m}$  aproximadamente, lo cual es un tamaño prácticamente igual al que había obtenido previamente a nivel laboratorio. Además, en cuanto al efecto de termorregulación, también obtuvo valores muy similares entre los materiales obtenidos, con lo cual concluyó que se tenía un criterio de escalado muy bueno y que, por lo tanto, era posible llevar a cabo el proceso a nivel industrial (Silva, 2009).

Capítulo 3. Descripción del problema

Existen dos tipos de seres vivos, los ectotermos, que son aquellos seres cuya temperatura corporal está regulada por la temperatura del ambiente que los rodea, y los endotermos, los cuales deben mantener una temperatura corporal estable y esta no depende de la temperatura de su entorno. El ser humano es un ser vivo que endotermo, y necesita mantener una temperatura aproximada de 36.7 °C para operar con normalidad y para ello se vale del calor metabólico (Mejía-Azcárete, 2015).

Debido a lo anterior, el cuerpo humano tiene una excelente capacidad de termorregulación, pero dicha capacidad puede ser rebasada en ambientes donde las temperaturas son extremas, requiriendo de prendas que nos permitan mantener una temperatura corporal térmica adecuada, pero que además maximicen el rendimiento energético y la comodidad del usuario (Interempresas, 2017).

Para solucionar este problema se han generado diferentes textiles con propiedades de termorregulación que incluyen el uso de microcápsulas de algún material de cambio de fase, sin embargo, el uso de estas presenta algunos problemas, como lo son la poca área de intercambio calorífico, así como la disminución o alteración de las propiedades mecánicas y físicas de los textiles. No obstante, poco se ha explorado el uso y aplicación de las nanocápsulas, siendo éstas una de las soluciones más prometedoras para aumentar la eficiencia de los PCM, tanto orgánicos como inorgánicos, debido a que promueven un área de superficie específica alta, permitiendo un mejor intercambio de calor sin comprometer las propiedades textiles intrínsecas, incluidas la estética, la transpirabilidad, la flexibilidad, etc. (Hosne Asif & Hasan, 2018) (Shchukina et al., 2018).

Capítulo 4. Justificación

Actualmente se está exigiendo que las prendas sean más funcionales e inteligentes, por lo que el uso de nanomateriales para dar acabados o recubrimientos ha tenido un gran impacto en el desarrollo de dichos textiles. Además, esta clase de materiales está aumentando las posibles áreas de aplicación en este tipo de industria (Joshi & Adak, 2019)(Hurford, 2009)(Joshi & Bhattacharyya, 2011).

Además, las empresas de la moda y la confección se valoraron en 1.2 billones de dólares a nivel mundial en 2014, y se espera que el tamaño del mercado tenga una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de 4.8% hasta 2025, principalmente impulsada por los mercados emergentes (Yetisen et al., 2016). En años recientes, el mercado mundial de textiles inteligentes se valuó en 2.3 mil millones de dólares y, como se observa en la Figura 2, se espera que alcance los 6 mil millones de dólares para 2025 de acuerdo con las previsiones (MarketsandMarkets, 2021).

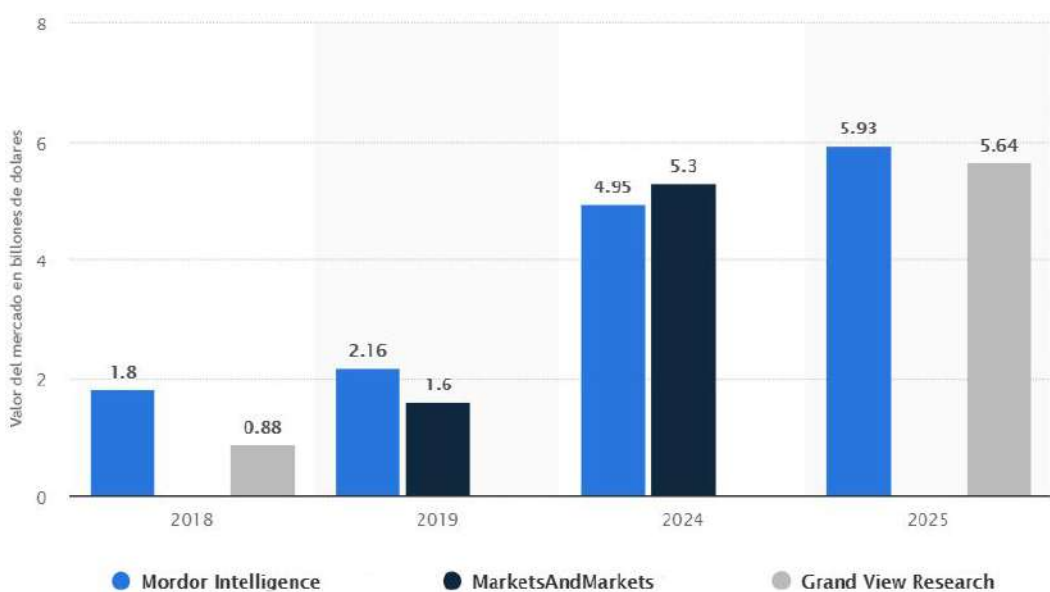


Figura 2. Valor del mercado de textiles inteligentes para 2025 de acuerdo con las previsiones compiladas de varias fuentes (Statista Research Department, 2020).

Debido a la alta demanda de prendas inteligentes y a sus prometedoras previsiones económicas, en años recientes se han estado realizando investigaciones en este campo, pero muchos textiles basados en nanotecnología todavía están limitados a escala de laboratorio, por lo que es importante encontrar métodos más eficientes para producir este tipo de telas, ya que el desarrollo de estas tecnologías a gran escala y con precios accesibles permitirá mejorar la calidad de vida de las personas en climas hostiles, así como mejorar las prendas espaciales, militares, deportivas, médicas, etc. (Mondal, 2008); sin mencionar que traerá consigo grandes beneficios económicos para la industria textil.

Por lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo, se propone generar un textil termorregulado a base de algodón mediante la incorporación de nanocápsulas de estireno/parafina (St@PW) para su potencial aplicación a nivel laboratorio y en un futuro a nivel industrial, ya que el método a utilizarse ya ha sido probado en una planta piloto y presenta buenos resultados (Silva, 2009).

Capítulo 5. Planteamiento teórico

### 5.1. Hipótesis

La incorporación de las nanocápsulas St@PW, obtenidas por el método de polimerización *in situ*, a un textil 100 % algodón, mediante el método de rasqueteado o relleno, convirtiéndolo en un textil termorregulado capaz de generar un microclima con una diferencia de al menos 1 °C respecto a un textil convencional.

### 5.2. Objetivo general

Obtener mediante la reacción de polimerización *in situ*, nanocápsulas de St@PW con propiedades termorreguladoras que puedan ser aplicadas en textiles con base en fibras de algodón.

### 5.3. Objetivos particulares

- Sintetizar a partir de la polimerización *in situ*, nanocápsulas de St@PW.
- Caracterizar el material fisicoquímicamente mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja (FTIR) para estudiar la morfología, composición y encapsulación del material.
- Incorporar el material generado a un textil a base de algodón mediante el proceso de rasqueteado.
- Evaluar las propiedades de termorregulación del material por medio de técnicas calorimétricas (TGA) y valorar su posible uso en textiles termorregulados mediante un microprocesador.
- Estudiar la fijación del material incorporado al textil a través del lavado acelerado.



Capítulo 6. Desarrollo experimental y técnicas utilizadas

## 6.1. Síntesis de las nanocápsulas

Las nanocápsulas se obtuvieron mediante polimerización *in situ* y para ello se usó estireno (St, 99 %, Sigma-Aldrich) y peróxido de benzoilo (BPO, 97 %, Sigma-Aldrich) como iniciador de la polimerización. La cera de parafina (PW, comercial) se empleó como material de cambio de fase y como estabilizador se utilizó polivinilpirrolidona (PVP, 40 000 g/mol, Sigma-Aldrich) grado reactivo. Además, se usó agua destilada y alcohol etílico absoluto (EtOH, 98 %, Sigma-Aldrich) para lavar las muestras (L. Sánchez et al., 2008).

Se siguieron tres diferentes rutas de síntesis, pero en ambas el proceso involucra dos fases: una fase continua que contiene agua y polivinilpirrolidona y una fase discontinua que contiene estireno, parafina y peróxido de benzoilo (L. Sánchez et al., 2008). Las cantidades de cada reactivo utilizado se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Reactivos y cantidades usadas para la síntesis de St@PW.

Reactivo	Cantidad (%w)
Estireno	9.00
Parafina	8.95
Polivinilpirrolidona	1.40
Peróxido de benzoilo	1.00
Agua	79.64

### 6.1.1. Síntesis con agitación mecánica

La fase continua se transfirió a un matraz de tres bocas, como el que se muestra en la Figura 3, el cual tiene conectado un refrigerante de serpentín para evitar la evaporación del material; con agitación de 150 rpm y a una temperatura de 40 °C durante 10 minutos. Al mismo tiempo, y con las mismas condiciones, se preparó la fase discontinua y transcurridos 10 minutos dicha fase se agregó en la fase continua bajo una atmosfera de nitrógeno y con una agitación de aproximadamente 650 rpm. La síntesis se mantuvo a una temperatura constante de 65 °C y se dejó reaccionar por 3 horas (Sánchez-Silva et al., 2010).

Finalmente, el material obtenido se lavó con agua y etanol, y se filtró con vacío para posteriormente dejarlo secar por 24 horas a temperatura ambiente.

### 6.1.1. Síntesis con baño sónico

Se preparó la fase continua en un matraz de tres bocas (Figura 3), a 40 °C y 150 rpm por 10 minutos; a la par se mezcló la fase discontinua, que contenía parafina y estireno, ayudados de un equipo de baño ultrasónico, marca BRANSON modelo 1510, a 47 kHz por 10 minutos. Acto seguido la fase discontinua se agregó a la fase continua en una atmosfera inerte y 5

minutos después, se añadió el peróxido de benzoilo para iniciar la polimerización. Dicha reacción se llevó a cabo a 65 °C por 3 horas (Konuklu et al., 2015).

Una vez finalizada la reacción, el resultado se lavó con agua y etanol para después ser filtrado con vacío y puesto a secar a temperatura ambiente por 24 horas.

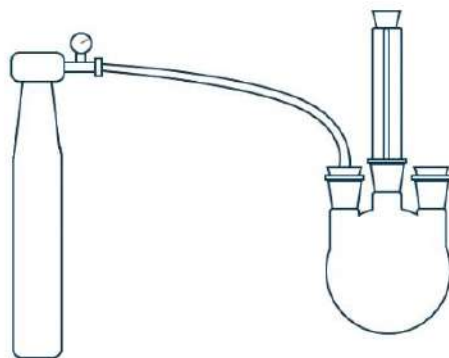


Figura 3. Esquema del diseño experimental para la síntesis de las nanocápsulas St@PW.

### 6.1.2. Síntesis con sonotrodo

Se hicieron por separado las fases continua y discontinua, pero ambas a 40 °C y 150 rpm por 10 minutos. Una vez teniendo las dos fases, éstas se mezclaron y se hicieron reaccionar por 10 minutos ayudados de un homogeneizador, UP200Ht de la marca Hielscher, con un sonotrodo d14 a 75 % de amplitud y 100% de cavitación, esto bajo atmosfera de nitrógeno y en un baño de hielo para evitar la evaporación del material. Una vez finalizado este tiempo, la solución se trasvasó a un matraz de tres bocas para continuar la reacción a 65 °C por 3 horas y manteniendo siempre la atmosfera inerte (Fang et al., 2008).

Concluida la síntesis, el material se lavó con agua y etanol, se filtró con vacío y se secó durante un día completo a temperatura ambiente.

### 6.2. Caracterizaciones fisicoquímicas

La morfología de las nanocápsulas St@PW, así como el tamaño de éstas, fue analizada empleando un microscopio electrónico de barrido (SEM), JEOL JSM-6060 LV con un voltaje de aceleración de 15 kV.

La nanoencapsulación de los materiales sintetizados se evaluó mediante el análisis de los grupos funcionales presentes, así como en los materiales que lo constituyen por separado,

por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), haciendo uso de espectrofotómetro IRAffinity-1S acoplado ATR con un rango de 600 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

La estabilidad térmica se determinó usando un equipo de termogravimetría (TGA), Q500 de TA Instruments, a una velocidad de calentamiento de 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  bajo una atmósfera de nitrógeno (P. Sánchez et al., 2010)(Yang et al., 2018).

### 6.3. Incorporación de las nanocápsulas de St@PW a un textil de algodón

Las cápsulas de St@PW fueron incorporadas a un textil convencional hecho 100 % de algodón mediante el método de rasqueteado, el cual consiste en tres pasos: mezclado, aplicación y curado. Para el primer paso se mezcló el ligante, o binder, con las nanocápsulas de St@PW para posteriormente ser aplicado en un trozo de tela de algodón de 2 X 2 cm con una espátula o rasqueta, esparciéndola pasta uniformemente. Finalmente, las telas pasaron a un proceso de curado con una plancha térmica, aproximadamente a 110  $^{\circ}\text{C}$  por 30 segundos utilizando papel cebolla entre la tela y la plancha para evitar quemar el material (Silva, 2009). Las cantidades utilizadas de binder y St@PW se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidades y muestras para realizar la incorporación de las nanocápsulas al sustrato textil.

Muestra-material	St@PW (g)	Binder (g)
Mecánica-50 %	0.15	0.3
Bañosónico-50 %	0.15	0.3
Sonotrodo-50 %	0.15	0.3
Mecánica-100 %	0.3	0.3
Bañosónico-100 %	0.3	0.3
Sonotrodo-100%	0.3	0.3

### 6.4. Evaluación del efecto termorregulador

Para evaluar el efecto de termorregulación de los textiles se empleó un microcontrolador, Arduino UNO, y un circuito de termistores de coeficiente de temperatura negativa, que compara la temperatura entre un textil de referencia y un textil termorregulado, el diagrama del circuito se muestra en la Figura 4.

Para dicha evaluación primero fue necesario calentar las muestras de los textiles a 60  $^{\circ}\text{C}$  en un horno de convección por 30 minutos, y posteriormente se introdujeron al circuito y se dejaron enfriar a temperatura ambiente (18  $^{\circ}\text{C}$  aproximadamente) por 30 minutos.

Además, dado que, de existir, la diferencia de temperatura entre los textiles generados y un textil convencional puede deberse al ligante, al aumentó de masa o, a ambos; se hizo

una prueba con un textil al cual se le adicionaron 0.6g de ligante, lo cual es la misma cantidad de masa extra que tienen los textiles con 0.3g de ligante y 0.3g de St@PW.

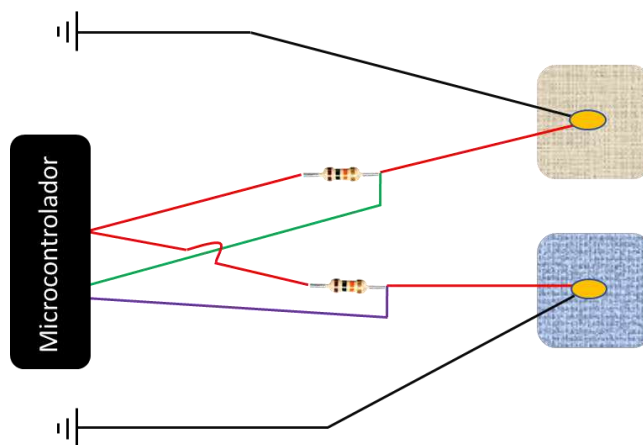


Figura 4. Diagrama del circuito utilizado para evaluar el efecto de termorregulación de los textiles.

### 6.5. Prueba de lavado acelerado

Para probar la fijación del material en los textiles inteligentes obtenidos después de someterse al lavado, los textiles recubiertos se introdujeron a un programa de tiempo corto en un equipo de lavado acelerado durante 30 minutos a 40 °C y con una concentración de 4 g/L de jabón para ropa (detergente en polvo Roma). Acto seguido las muestras fueron enjuagadas con 100 mL de agua destilada por un minuto en dos ocasiones y se dejaron secar a 60 °C en un horno de convección (ISO, 2010).

Los textiles analizados fueron pesados antes y después del proceso de lavado y con ello se determinó la cantidad de material que se perdió durante el proceso. Finalmente se evaluó de nueva cuenta el comportamiento térmico de los textiles para analizar si hubo cambios respecto a los textiles previo a ser lavados.

Capítulo 7. Resultados y discusión

### 7.1. Síntesis y caracterización de nanocápsulas (St@PW)

Se obtuvo un material diferente correspondiente a cada uno de los métodos de síntesis, Figura 5, sin embargo, todos presentaban características similares entre sí, como lo son el color blanco y la apariencia aceitosa.

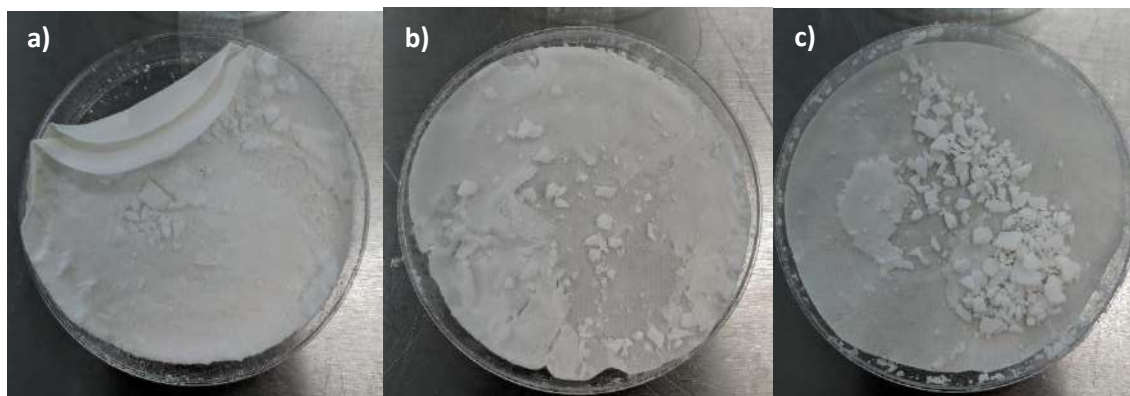


Figura 5. Material obtenido de cada síntesis realizada: a) con agitación mecánica, b) con baño-sónico y c) con sonotrodo.

La microscopía electrónica de barrido se realizó con el fin de analizar la morfología de los materiales sintetizados, así como de conocer el tamaño de las nanocápsulas formadas. En la Figura 6, se observan las microfotografías con aumento de 250 X y 1000 X de los tres materiales, para el St@PW con agitación mecánica se puede ver, con un aumento de 250 X (Figura 6a), que hay principalmente morfologías amorfas, pero con el aumento 1000 X (Figura 6b) se observan formas esféricas de aproximadamente 45  $\mu\text{m}$ .

En el St@PW con baño sónico, igualmente, con un aumento de 500 X (Figura 6c), se observaron morfologías amorfas, pero con un mayor aumento (Figura 6d), de nueva cuenta, se ven esferas con un diámetro de alrededor de 50  $\mu\text{m}$ .

Por último, en el St@PW con sonotrodo, tanto con un aumento de 250 X como de 1000 X, Figura 6e y Figura 6f respectivamente, se ven morfologías amorfas, y algunas de estas morfologías sugieren ser cápsulas que se rompieron.

Se llevó a cabo espectroscopía ATR-FTIR para determinar la correcta encapsulación de la parafina, esto mediante el análisis de los grupos funcionales presentes en los materiales por separado, cuyas estructuras moleculares se pueden ver en la Figura 7, así como en los polvos obtenidos en las síntesis realizadas, ya que se espera que los materiales sintetizados presenten un espectro de ATR-FTIR igual al del poliestireno por separado, pues en teoría, el poliestireno debe estar cubriendo la parafina y por lo tanto, las vibraciones de éste deberían predominar sobre las de la parafina.

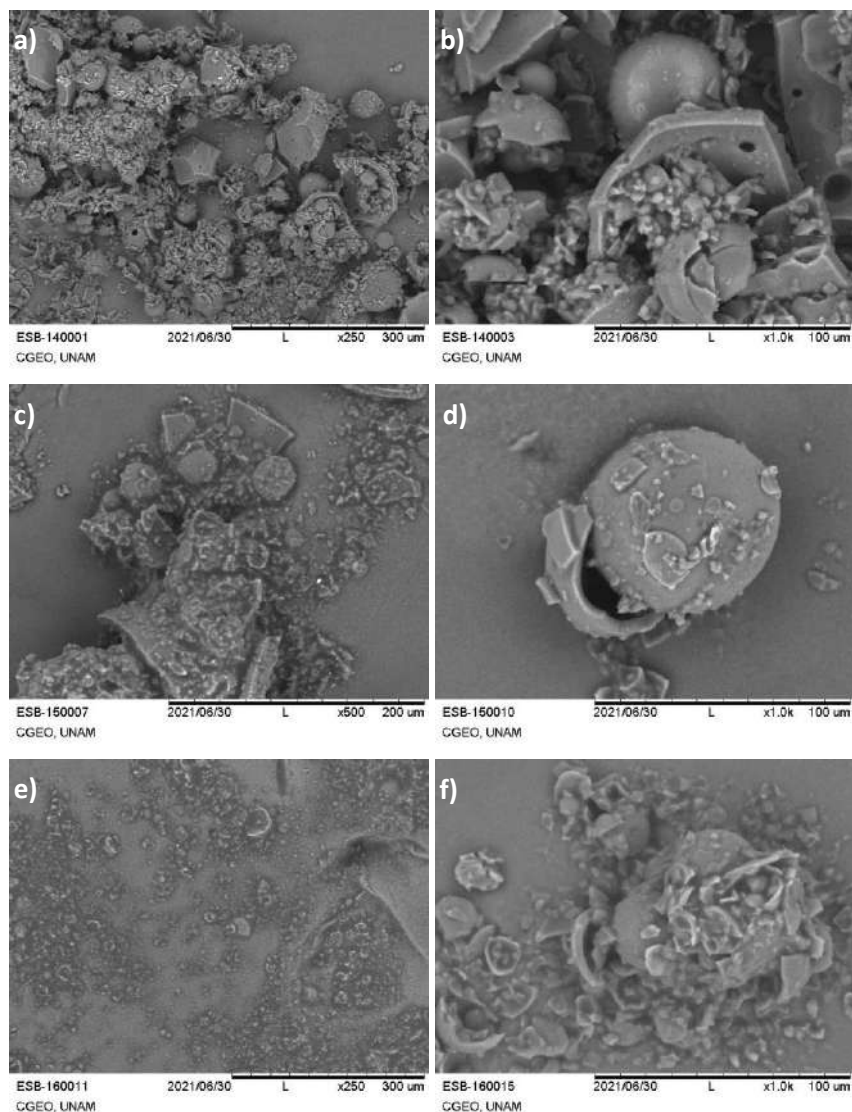


Figura 6. Micrografías de los diferentes materiales sintetizados: a) St@PW-mecánica 250 X, b) St@PW-mecánica 1000 X, c) St@PW-bañosónico 500 X, d) St@PW-bañosónico 1000 X, e) St@PW-sonotrodo 250 X y f) St@PW-sonotrodo 1000 X.

El espectro de los materiales St@PW se presentan en la Figura 8, y en ella se pueden observar los espectros de referencia del poliestireno y parafina. En el espectro del poliestireno (línea fucsia) se observan cuatro bandas principales; la banda localizada en  $3000-3030\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones asociadas al estiramiento del enlace C – H aromático, la banda en  $2930\text{ cm}^{-1}$  de la vibración del enlace C – H alifático, la señal de  $1600-1495\text{ cm}^{-1}$  característica de las vibraciones asociadas al enlace C – C en el anillo de benceno y por último la banda de  $750-700\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la deformación de dicho anillo (Mochane & Luyt, 2012).

En espectro de la parafina, se observan tres grupos de señales: las que van de  $2916$  a  $2848\text{ cm}^{-1}$  que se asocian a las vibraciones del enlace C – H alifático, la de  $1462\text{ cm}^{-1}$  que es propia



de la vibración de flexión del enlace C – H, y la de  $718\text{cm}^{-1}$  que corresponde a la vibración en el plano del grupo  $\text{CH}_2$  (Mochane & Luyt, 2012).

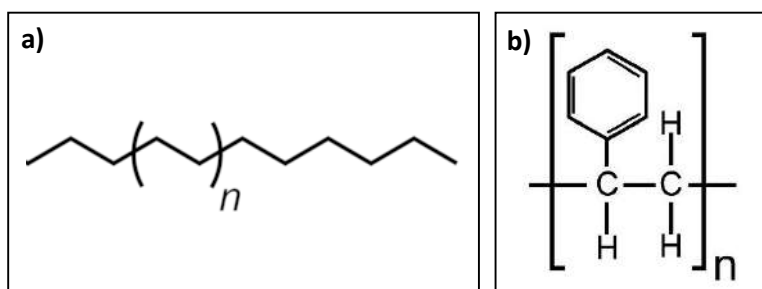


Figura 7. Estructura molecular de: a) parafina (Floros, 2016) y b) poliestireno (Findlay, 2018).

Respecto a los espectros de los materiales ST@PW, podemos ver que presentan las mismas vibraciones que la parafina por separado, pero con la diferencia de que son de menor intensidad. Lo anterior nos sugiere que el material no se ha encapsulado adecuadamente ya que, de así serlo, los espectros de los materiales deberían de presentar las mismas vibraciones que el poliestireno, ya que este sería el material que expuesto; la parafina estaría por debajo del poliestireno.

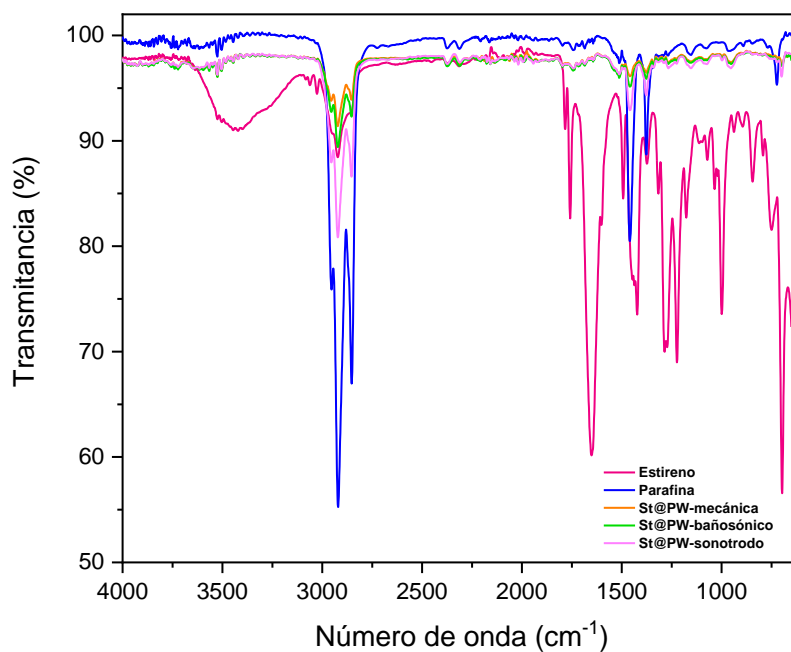


Figura 8. Espectros FTIR de 600 a  $4000\text{cm}^{-1}$  de los materiales ST@PW sintetizados, así como de la parafina y del estireno.

Sin embargo, el que no esté correctamente encapsulado, no quiere decir que no exista dicho encapsulamiento, ya que, como se puede ver en la Figura 9, las vibraciones que van de  $2916$  a  $2848\text{cm}^{-1}$ , correspondientes al enlace C – H de la cadena alifática de la parafina, disminuyen su intensidad en los materiales sintetizados, y al ser el FTIR una técnica semicuantitativa, esto nos podría indicar que hay una parte de la parafina que sí se ha

encapsulado, y basándonos en esta suposición, la síntesis con agitación mecánica fue la que mejor resultado de encapsulamiento tuvo. Por su parte, las síntesis en las que se usó baño sónico y sonotrodo sugieren una menor eficiencia de encapsulación pues las señales anteriormente mencionadas presentan una menor disminución en su intensidad, lo cual nos sugiere que los materiales contienen mayor cantidad de parafina fuera del estireno.

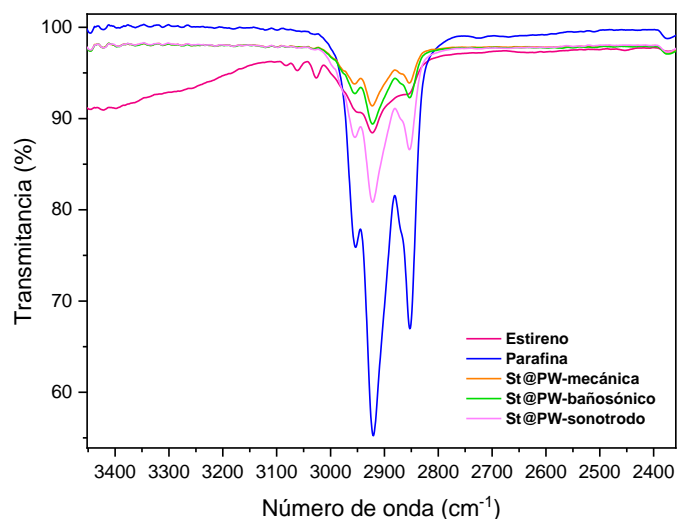


Figura 9. Espectro FTIR para un mayor detalle de la vibración del enlace C-H alifático de la parafina.

La termogravimetría de los materiales obtenidos se llevó a cabo para estudiar la estabilidad térmica de dichos materiales; y para ello se hicieron pruebas del resultado de cada una de las síntesis, así como del material de cambio de fase por sí solo.

En la Figura 10a se observa el termograma TGA de la parafina, que es el material de cambio de fase. Se observa que entre las temperaturas de 150 °C y 250 °C hay una pérdida de peso del 100 % del material, la cual está asociada a la evaporación de la parafina (Sánchez-Silva et al., 2010).

Para el caso del St@PW con agitación mecánica, Figura 10b, se puede ver que a los 100°C hay una pérdida de peso de un 8.1 % debida a la pérdida de humedad de la muestra; después, entre las temperaturas de 150 y 250 °C observamos que el peso decae otro 52.74 %, esto como resultado de la evaporación del material de cambio de fase; y finalmente, entre 325 y 450°C se pierde el peso que restaba, que equivale al 39.16% del total, y esto es debido a la degradación del poliestireno (Sánchez-Silva et al., 2010; Silva, 2009).

En el St@PW donde se empleó baño sónico (Figura 10c) y donde se usó el sonotrodo (Figura 10d), se ve el mismo comportamiento térmico que en el St@PW con agitación mecánica, salvo que el porcentaje de peso presenta ligeras variaciones. Para el primero hay pérdidas de peso del 7.84, 68.16 y 24 % y para el segundo las pérdidas son de 9.05, 67.07 y 23.88 %.

Todo lo anterior, nos indica que los materiales sintetizados no pueden ser sometidos a procesos donde existan temperaturas mayores a los 150 °C, debido a que habría una pérdida considerable del material de cambio de fase y por tanto el St@PW perdería gran parte de su propiedad de termorregulación ya que ésta está dada por el PCM. No obstante, el material podría ser aplicado para crear un textil termorregulado mediante un proceso que no requiera de temperaturas superiores a los 150 °C, y para su cuidado, debería de darse una instrucción de no ser planchado con a temperaturas mayores a dicha temperatura.

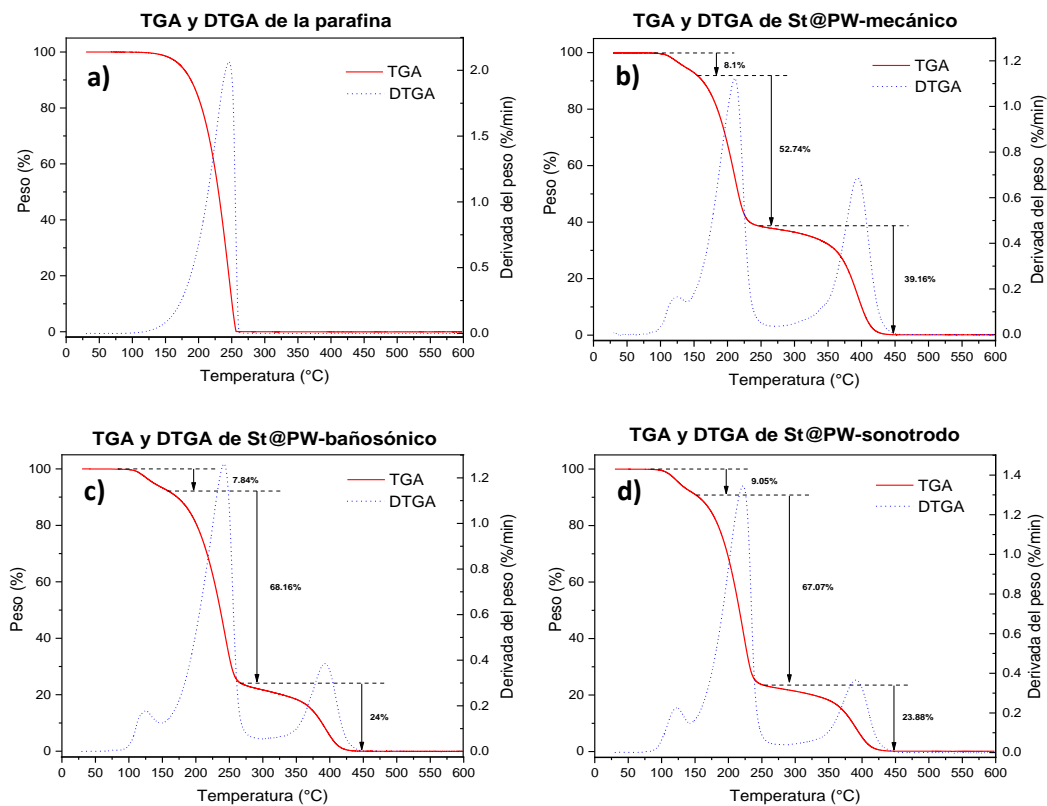


Figura 10. Análisis termogravimétrico de los materiales sintetizados y de la parafina: a) parafina, b) St@PW-mecánica, c) St@PW-bañosónico y d) St@PW-sonotrodo.

Se obtuvieron 9 muestras de tela de algodón de 2 X 2 cm, con la respectiva cantidad de binder y de material sintetizado (Figura 11), y todos los trozos de textil termorregulados que se generaron tienen una apariencia y sensación al tacto casi idéntica entre sí.

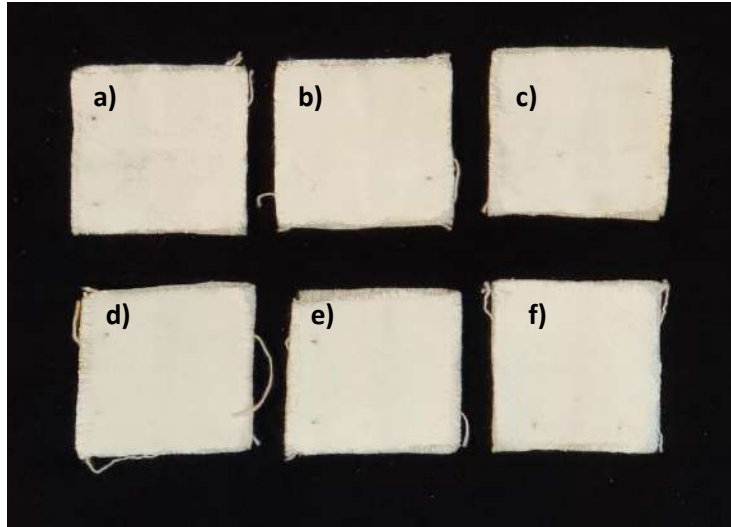


Figura 11. Textiles termorregulados generados: a) mecánica-50%, b) bañosónico-50%, c) sonotrodo-50%, d) mecánica-100%, e) bañosónico-100% y f) sonotrodo-100%

Como se observa en la Figura 12, hay una diferencia notoria entre un trozo de tela sin recubrir y otro ya recubierto. A simple vista se observa que el textil recubierto tiene una apariencia menos rugosa y que es de un blanco más brillante; además, tiene una sensación al tacto mucho menos flexible que un textil sin recubrir.

Dichas diferencias entre las telas generadas y las que son 100 % de algodón, se deben principalmente a la resina que se usó como ligante, debido que ésta es de color blanco, además, al colocarse con la rasqueta, la pasta rellena los huecos que presenta el sustrato original, dando como resultado una apariencia mucho más lisa y; finalmente, la tela se vuelve más rígida porque en el proceso de curado del binder, este se endurece y les da esta propiedad a los textiles.

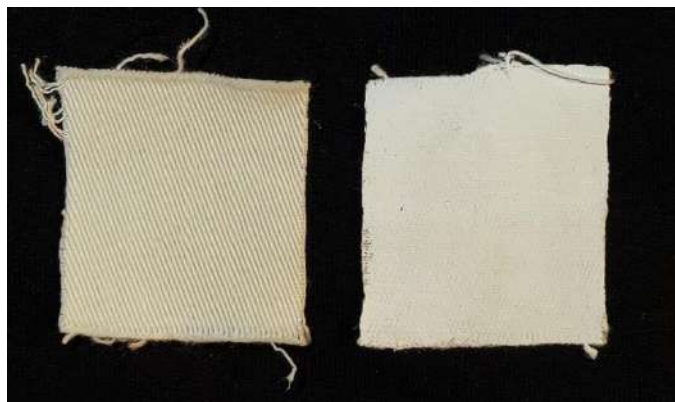


Figura 12. Comparación entre un textil termorregulado generado (derecha) y un textil 100% algodón (izquierda).

Cabe mencionar que, si en un futuro se pretende generar prendas usables con este tipo de tecnología, es importante tener en cuenta que las características del textil original serán modificadas al agregarles un recubrimiento.

La Figura 13 se muestra cómo se comporta la diferencia de temperatura entre un textil 100 % de algodón y los diferentes textiles generados al incorporar distintas cantidades de los materiales sintetizados. Para observar esta diferencia térmica, ambas telas se calentaron a la par en un horno de convección para posteriormente dejarse enfriar a temperatura ambiente por 30 minutos y durante este tiempo se evaluó su comportamiento térmico mediante un microcontrolador y un circuito de termistores de coeficiente de temperatura negativos, con los cuales se compara la temperatura entre un textil de referencia y un textil termorregulado, obteniendo la diferencia de temperatura que existe entre ellos.

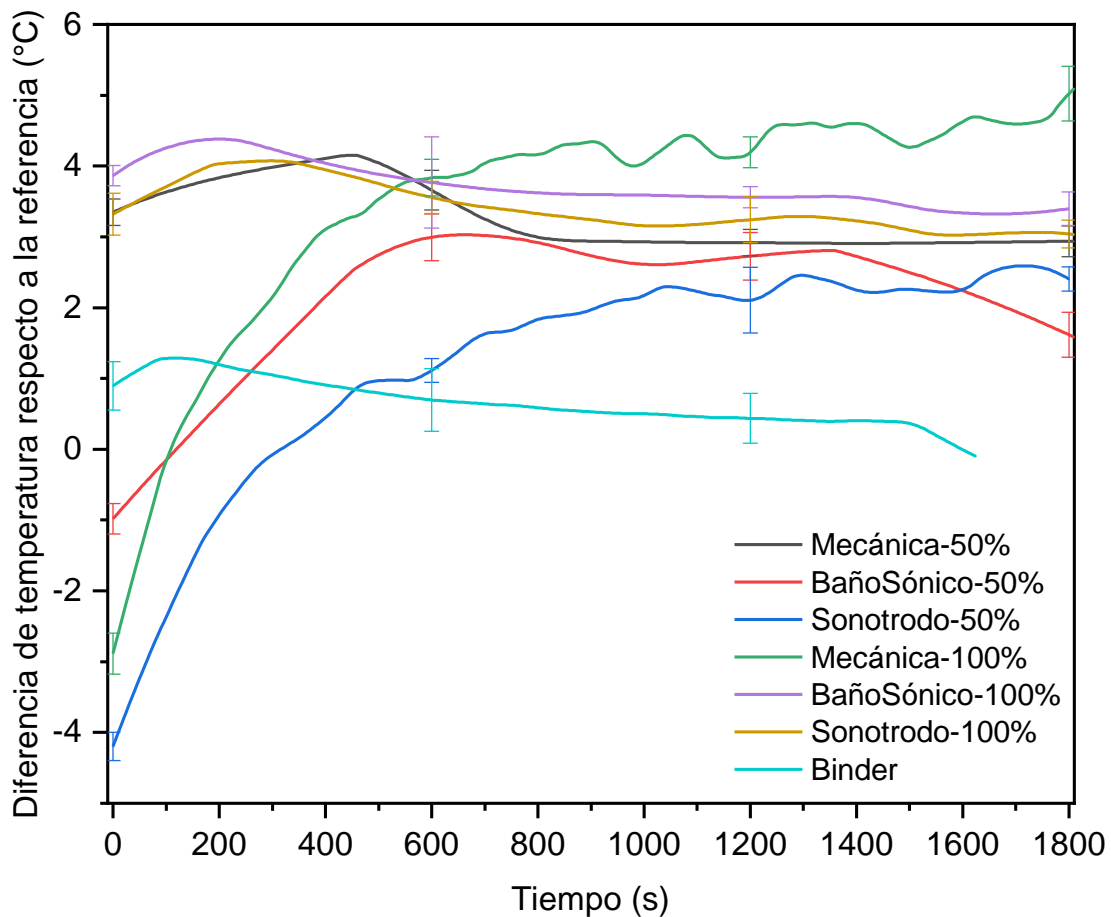


Figura 13. Evaluación del efecto termorregulador de los textiles generados.

Cabe mencionar que el método para medir el comportamiento térmico de los textiles usando un microcontrolador y termistores, no había sido reportado anteriormente, por lo tanto, es un método novedoso y de fácil implementación para este tipo de aplicaciones. Ahora bien, la gráfica se realizó haciendo mediciones en intervalos de 5 segundos, consecuentemente, no es una gráfica continua, sin embargo, se decidió agregar solo barras de error en puntos específicos que nos servirían de comparación: 0, 10, 20 y 30 minutos.

Se puede observar que los textiles que tienen una relación de 100% de St@PW respecto al binder, en cualquiera de sus variantes, al cabo de los 30 minutos, logran una diferencia de temperatura mayor que aquellos cuya relación entre material sintetizado y ligante es de solo 50%. Sin embargo, aún estos últimos textiles presentan una diferencia mayor a la que presenta un textil que contiene 0.6 g de binder, con lo cual se puede descartar que la diferencia de temperatura se deba a este último componente o a la masa total de material adicionado al sustrato.

Siguiendo con el comportamiento térmico, se observa que las muestras mecánica-100 %, bañosónico-50 % y sonotrodo-50 %, presentan el efecto de termorregulación deseado, ya que inicialmente, cuando la tela es sacada del horno de convección, y que por tanto está caliente, los textiles tienen una temperatura menor al textil convencional, y mientras va pasando el tiempo y las telas se enfrían, los textiles brindan una temperatura mayor a la referencia y después de un tiempo está temperatura da la sensación de que se estabiliza, lo que significaría que se está generando un microclima.

De forma más específica, y como se ve en la Tabla 6, el textil con mayor diferencia de temperatura después de 30 minutos de enfriamiento es el Mecánica-100% y dicha diferencia es de aproximadamente 5 °C, además, le siguen los que también bañosónico-100% con 3.39 °C y sonotrodo-100% con 3.04 °C. Ahora bien, las muestras mecánica-50%, bañosónico-50% y sonotrodo-50%, que solo contienen 0.15 g de St@PW, presentan una diferencia respecto a la referencia de 2.93, 1.61 y 2.40 °C, respectivamente.

Tabla 6. Valores de la diferencia de temperatura entre un textil termorregulado y uno convencional a los 0, 10, 20 y 30 minutos.

Textil con material incorporado	Tiempo (min)			
	0	10	20	30
Binder	-1.93°C ± 0.34	0.71°C ± 0.44	0.43°C ± 0.35	-
Mácanica-50%	3.37°C ± 0.18	3.65°C ± 0.27	2.91°C ± 0.18	2.93°C ± 0.21
Bañosónico-50%	-0.97°C ± 0.21	3.02°C ± 0.32	2.72°C ± 0.33	1.61°C ± 0.31
Sonotrodo-50%	-3.98°C ± 0.19	1.13°C ± 0.16	2.10°C ± 0.46	2.40°C ± 0.16
Mácanica-100%	-2.88°C ± 0.28	3.84°C ± 0.25	4.19°C ± 0.21	5.02°C ± 0.38
BañoSónico-100%	3.86°C ± 0.14	3.76°C ± 0.64	3.56°C ± 0.14	3.39°C ± 0.23
Sonotrodo-100%	3.35°C ± 0.29	3.55°C ± 0.22	3.24°C ± 0.32	3.04°C ± 0.19

Analizando los datos, se concluye que de entre las telas que contienen 0.3 g de material, la que mejores resultados presenta, en cuanto a diferencia de temperatura, es la mecánica-100% y para los textiles a los que se les agregó únicamente 0.15 g de material, la que mejores resultados obtuvo en este aspecto, es la mecánica-50%.

Dichos resultados se podrían explicar considerando que, como sugieren la espectroscopia de infrarrojo y la microscopía electrónica de barrido, el St@PW-mecánica presentaría una mayor encapsulación del material, lo cual podría propiciar un mejor desempeño en el efecto de termorregulación, ya que evitaría que la parafina encapsulada se perdiera entre cada ciclo de funcionamiento del material. Esto también se puede apreciar en la

termogravimetría de los materiales, donde el St@PW-mecánica presenta una menor pérdida de peso en la evaporación de la parafina y lo mismo pasaría en el cambio de sólido a líquido. No obstante, con todos los textiles generados se logra una diferencia de temperatura superior a otras telas de este tipo que se han reportado en la literatura (P. Sánchez et al., 2010), siendo dicha diferencia, en el mejor de los casos, mayor en hasta un 200%.

Por todo lo visto anteriormente, se puede decir que, de entre los diferentes textiles termorregulados generados, el textil con mejores resultados es el mecánica-100%, que contiene 0.3 g de St@PW-mecánica, ya que presenta el efecto de termorregulación deseada y genera un microclima con una diferencia de temperaturas respecto a un textil convencional de hasta 5 °C.

Una vez que los materiales sintetizados han sido incorporados a un sustrato textil, y dado que en un futuro se espera generar prendas 100 % funcionales con este tipo de tecnología, es importante estudiar cuál será su comportamiento después de someter el textil a una sesión de lavado, es por ello por lo que se realizó una prueba de lavado acelerado a los seis textiles que se generaron y después se evaluó nuevamente su comportamiento térmico en las condiciones en las que se habían evaluado originalmente.

En la Figura 14 se presentan los resultados obtenidos de dicha evaluación térmica, y se puede notar que, en todos los casos, la diferencia de temperatura después del lavado acelerado es menor a la que tenían los textiles antes de ser sometidos a dicha prueba.

Además, como se observa en la Tabla 7, después de ser lavados, todos los textiles perdieron el efecto de termorregulación que se presentaba cuando la tela aún estaba caliente, ya que la diferencia de temperatura que presentan al inicio de prueba es mínima o incluso negativa, respecto a un textil convencional, pero siguen manteniendo un microclima constante una vez que las temperaturas descienden, que es aproximadamente a los 10 minutos.

Tabla 7. Valores de la diferencia de temperatura entre un textil termorregulado y uno convencional después de un proceso de lavado acelerado a los 0, 10, 20 y 30min.

Textil con material incorporado	Tiempo (min)			
	0	10	20	30
Mácanica-50%	1.22°C ± 0.32	1.54°C ± 0.19	1.44°C ± 0.26	1.31°C ± 0.28
Bañosónico-50%	-	2.41°C ± 0.22	1.35°C ± 0.57	1.24°C ± 0.35
Sonotrodo-50%	-0.19°C ± 0.26	0.44°C ± 0.34	0.94°C ± 0.23	0.72°C ± 0.21
Mácanica-100%	0.81°C ± 0.22	2.72°C ± 0.41	2.99°C ± 0.19	3.06°C ± 0.27
BañoSónico-100%	3.93°C ± 0.19	2.78°C ± 0.35	2.42°C ± 0.20	2.47°C ± 0.18
Sonotrodo-100%	-	3.17°C ± 0.18	2.21°C ± 0.26	1.93°C ± 0.29

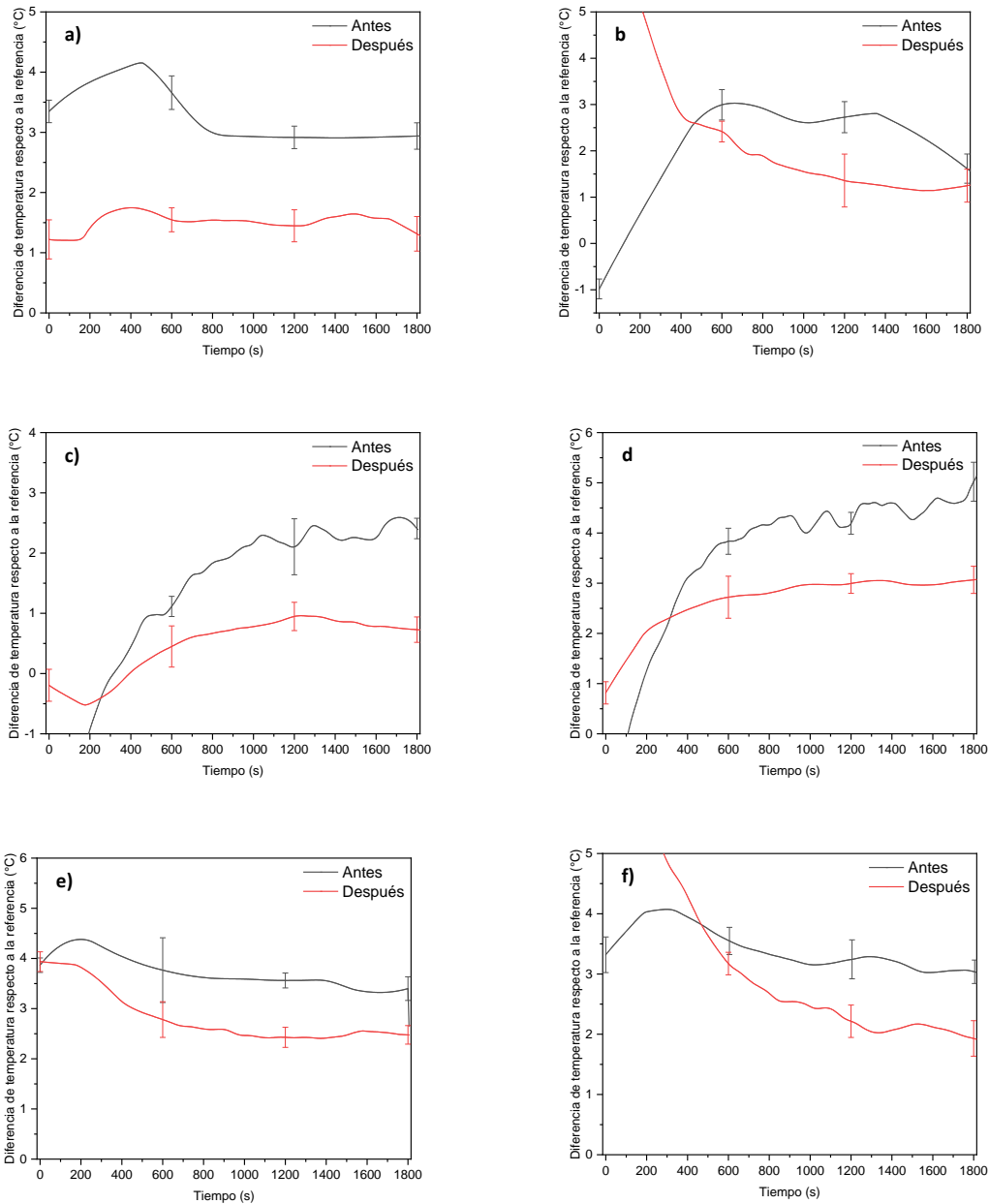


Figura 14. Evaluación del efecto de termorregulación de los textiles generados antes y después del lavado acelerado; a) mecánica-50%, b) bañosónico-50%, c) sonotrodo-50%, d) mecánica-100%, e) bañosónico-100% y f) sonotrodo-100%.

También, se puede ver que, al igual que antes de ser lavados, se sigue manteniendo la tendencia en la cual los textiles con St@PW-mecánica tienen mayor diferencia de temperatura, cada uno en su respectiva categoría de peso.

Explicar la pérdida en la eficiencia del material después de ser lavado es relativamente sencillo, y es que, como se observa en la



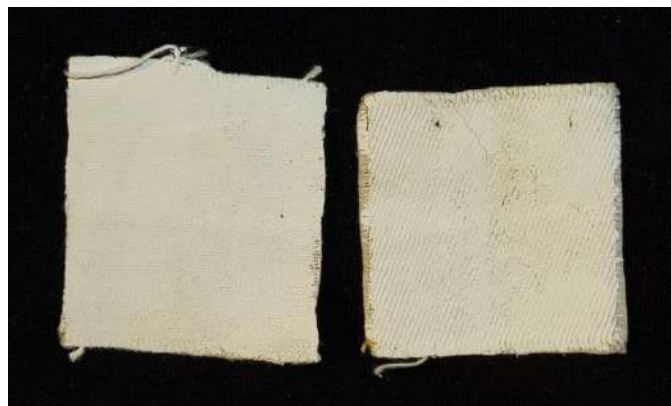
Tabla 8, todos los textiles perdieron cierta cantidad del material que se les había adicionado; en promedio todos tuvieron una pérdida de un 6.11%, que se reparte entre material sintetizado y binder.

*Tabla 8. Peso antes y después de un lavado acelerado de los textiles generados.*

Textil	Material adicionado antes del lavado (g)	Material perdido durante el lavado(g)	% de perdida
Mecánica-50%	0.45	0.041	9.11
Bañosónico-50%	0.45	0.026	4.67
Sonotrodo-50%	0.45	0.021	6.22
Mecánica-100%	0.60	0.042	4.33
Bañosónico-100%	0.60	0.028	7.00
Sonotrodo-100%	0.60	0.032	5.33

En lo que respecta a los materiales sintetizados adicionados a las muestras, la pérdida de peso se puede atribuir a la parafina no encapsulada pero que aún estaba presente en el material, lo cual también explicaría la gran pérdida de eficacia de los materiales, así como de la pérdida del efecto de termorregulación que se presentaba en temperaturas cálidas.

Además de lo anterior, en la Figura 15 se puede observar una comparación entre un textil antes y después de ser sometido a lavado. En el primero, se aprecia una textura uniforme, completamente lisa y de un color blanco brillante, mientras que en el segundo se observa cierto desgaste y la textura ya no es completamente lisa, sino que se pueden ver los detalles de hilado del sustrato de algodón, además, el color pasa de ser un blanco brillante a un tono un tanto más opaco.



*Figura 15. Textil termorregulado antes (izquierda) y después del lavado acelerado (derecha).*

Capítulo 8. Conclusiones

Mediante el método de polimerización *in-situ* se obtuvieron tres materiales diferentes: St@PW-mecánica, obtenido mediante agitación mecánica; St@PW-bañosónico, asistido con baño ultrasónico y St@PW-sonotrodo, generado mediante el uso de sonoquímica. No obstante, los tres materiales son un polvo blanco con apariencia aceitosa.

La morfología y tamaño del material se evaluó empleando la microscopía electrónica de barrido y se observó que en el St@PW-mecánica y en el St@PW-bañosónico, si bien la mayor parte del material presenta una morfología amorfa, también hay una parte que sí presenta morfología esférica, lo cual sugiere que sí hubo formación de las cápsulas que se esperaban obtener, y de ser así, tendrían un tamaño de aproximadamente 45µm. Por su parte, en el St@PW-sonotrodo solo se puede observar lo que parecieran ser capsulas que se rompieron, los que nos indicaría que la energía proporcionada por la cavitación sí formó las cápsulas que se buscaban, pero también que dicha energía fue más de la necesaria, y por tal motivo las cápsulas se rompieron.

Con la espectroscopía de infrarrojo (FTIR) se pudieron detectar los grupos funcionales característicos de la parafina y del estireno en los materiales sintetizados. De este análisis se puede deducir que no hay una correcta encapsulación del poliestireno hacia la parafina, pues de ser así, las vibraciones correspondientes a la parafina no deberían estar presentes en el espectro de los materiales generados, ya que el poliestireno es el material de cubierta y por lo tanto, las señales de sus vibraciones deberían predominar en dichos espectros, sin embargo, son las señales de la parafina las que predominan, sugiriendo que este material aún se encontraba encima del polímero.

No obstante, la disminución en la señal del enlace C – H de la cadena alifática de la parafina nos podría indicar que hay una cierta cantidad de material que sí se encapsuló, siendo el St@PW-mecánica el que mayor encapsulación presentaría, seguido del St@PW-bañosónico y finalmente el St@PW-sonotrodo; lo cual es coherente con lo que se vio en la microscopía electrónica de barrido.

En el estudio de termogravimetría que se les hizo a los materiales se observan tres pérdidas de peso, la primera siendo de aproximadamente 10 % y a 100 °C se puede atribuir a la evaporación de humedad remanente en los materiales, la segunda es la de mayor porcentaje de pérdida, de entre 50 y 70 % , y se da a los 150 °C, dicha pérdida está asociada a la evaporación de la parafina, que como se ve en su propio análisis TGA, va de 150 °C a aproximadamente 280 °C; finalmente, la última pérdida de peso, a los 350 °C no es más que la degradación del poliestireno.

Los materiales generados fueron fijados correctamente mediante el método de rasquetado, sin embargo, presentan una apariencia y sensación al tacto más áspera y rígida que un textil 100% de algodón.

Se observó que todos los textiles generados presentan una diferencia de temperatura respecto a un textil convencional de hasta 5.02 °C cuando se usa igual cantidad de binder

que de los materiales generados, siendo el St@PW-mecánica el que mejores resultados de eficiencia térmica otorga, ya que presenta un efecto de termorregulación tanto en temperaturas cálidas, como cuando hay una disminución en temperatura; propiciando así la creación de un microclima. Esto nuevamente hace sentido con los que se observa en las caracterizaciones fisicoquímicas, ya que en todas ellas se sugiere que el St@PW-mecánica es el que presenta mayor grado de encapsulación y en el TGA tiene menos pérdida de peso en proceso de cambio de fase el PCM.

También vale la pena señalar, que todos los materiales generados confieren a la tela una mayor diferencia de temperatura respecto a un textil convencional de hasta 200% más que algunos textiles similares ya reportados en la literatura, los cuales en apenas minuto y medio ya presentan una diferencia de tan solo 2.5 °C (P. Sánchez et al., 2010).

Finalmente se observó que el método utilizado para fijar los materiales obtenidos al sustrato textil presenta, en promedio, hasta un 6% de pérdidas en peso después de ser sometido a un proceso de lavado acelerado, lo cual ocasiona que la diferencia de temperatura de los textiles generados disminuya en aproximadamente 1.3 °C, esto debido a la posible pérdida tanto de la parafina que no encapsuló correctamente y a la del demás del material.

En general, podemos concluir que sí bien se tienen resultados prometedores, aún es necesario hacer más investigación antes de poder implementar esta tecnología en un textil comercial.

Capítulo 9. Perspectivas a futuro

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se propone continuar con los siguientes puntos, para así mejorar y avanzar en el proyecto:

- Establecer mejores condiciones de síntesis para lograr una mayor encapsulación de la parafina y a la vez, disminuir los tamaños de las cápsulas obtenidas.
- Hacer un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para obtener los calores latentes de fusión y cristalización del material de cambio de fase y mediante estos datos, determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del material.
- Llevar a cabo una espectroscopía electrónica de transmisión de los materiales sintetizados para conocer con mayor precisión el tamaño de las cápsulas obtenidas.
- Elegir un nuevo método de incorporación de los materiales sintetizados al sustrato textil que nos brinde una mayor incorporación y retención del material.

Capítulo 10. Anexos

### 10.1. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Para el propósito de una caracterización detallada de los materiales, el microscopio óptico ha sido suplantado por dos instrumentos más potentes: el Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM) y el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Debido a su costo razonable y la amplia gama de información que puede proporcionar, el SEM a menudo reemplaza al microscopio óptico como la herramienta de inicio preferida para el estudio de los materiales a escala microscópica.

El SEM proporciona al investigador una imagen en 3D muy ampliada de la superficie de un material ya que su resolución puede acercarse a unos pocos nanómetros y puede operar con ampliaciones que van desde los 10x hasta 300,000x.

Además, en este microscopio no solo se produce información morfológica y topología del material, sino que además con algunos equipamientos extras, se puede estudiar la composición química de este.

En el SEM, una fuente de electrones se enfoca (en el vacío) en una sonda fina que se traza sobre la superficie de la muestra Figura S 1. A medida que los electrones penetran en la superficie, ocurren varias interacciones que pueden resultar en la emisión de electrones o fotones desde (o a través) de la superficie. Una fracción razonable de los electrones emitidos puede ser recolectada por detectores apropiados, y la salida puede usarse para modular el brillo de un tubo de rayos catódicos (CRT) cuyas entradas x- y y- son impulsadas en sincronismo con los voltajes x-y que rasterizan el haz de electrones. De esta forma se produce una imagen en el CRT; cada punto que el haz incide en la muestra se mapea directamente en un punto correspondiente en la pantalla. Si la amplitud del voltaje en diente de sierra aplicado a los amplificadores de deflexión x- y y- en el SEM se reduce por algún factor mientras que el voltaje en diente de sierra del CRT se mantiene fijo en el nivel necesario para producir una visualización de pantalla completa, la ampliación, como visto en la pantalla, se incrementará en el mismo factor.

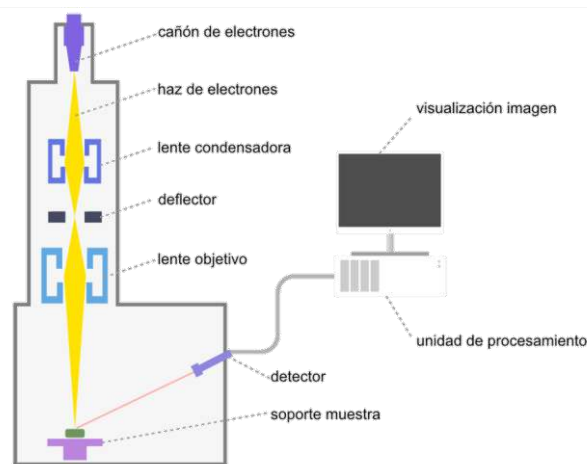


Figura S 1. Diagrama de los componentes de un SEM.



Las imágenes principales producidas en el SEM son de tres tipos: imágenes de electrones secundarios, imágenes de electrones retrodispersados y mapas elementales de rayos X. Los electrones secundarios y retrodispersados se separan convencionalmente según sus energías (Bindel, 1992).

## 10.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja es una de las técnicas favoritas que pueden proporcionar información sobre el enlace químico en un material, es particularmente útil para el análisis no destructivo de sólidos y películas delgadas, para las cuales existen pocos métodos alternativos. Los líquidos y los gases también se estudian comúnmente, más a menudo junto con otras técnicas. Para el análisis cuantitativo, la instrumentación moderna puede proporcionar una repetibilidad de medición superior al 0,1 %. Sin embargo, la exactitud y la precisión son más comúnmente del orden del 5.0% (Neal Cox, 1992).

La espectroscopia infrarroja (espectroscopia IR o espectroscopia vibratoria) es la medida de la interacción de la radiación infrarroja con la materia por absorción, emisión o reflexión. Se utiliza para estudiar e identificar sustancias químicas o grupos funcionales en formas sólidas, líquidas o gaseosas. Se puede utilizar para caracterizar nuevos materiales o identificar y verificar muestras conocidas y desconocidas. El método o técnica de espectroscopia infrarroja se lleva a cabo con un instrumento llamado espectrómetro infrarrojo (o espectrofotómetro) que produce un espectro infrarrojo. Un espectro IR se puede visualizar en un gráfico de absorbancia de luz infrarroja (o transmitancia) en el eje vertical frente a la frecuencia o longitud de onda en el eje horizontal. Las unidades típicas de frecuencia utilizadas en los espectros IR son centímetros recíprocos (a veces llamados números de onda), con el símbolo  $\text{cm}^{-1}$ . Las unidades de longitud de onda IR se dan comúnmente en micrómetros (anteriormente llamados "micras"), símbolo  $\mu\text{m}$ , que están relacionados con los números de onda de una manera recíproca. Un instrumento de laboratorio común que utiliza esta técnica es un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR).

La porción infrarroja del espectro electromagnético generalmente se divide en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, llamado así por su relación con el espectro visible. El infrarrojo cercano de mayor energía, aproximadamente  $14,000\text{--}4,000\text{ cm}^{-1}$  (longitud de onda de  $0.7\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ) puede excitar modos de sobretono o combinación de vibraciones moleculares. El infrarrojo medio, aproximadamente  $4,000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  ( $2.5\text{--}25\ \mu\text{m}$ ) se utiliza generalmente para estudiar las vibraciones fundamentales y la estructura rotacional-vibratoria asociada. El infrarrojo lejano, aproximadamente  $400\text{--}10\text{ cm}^{-1}$  ( $25\text{--}1,000\ \mu\text{m}$ ) tiene baja energía y puede ser utilizado para espectroscopia rotacional y vibraciones de baja frecuencia. La región de  $2\text{--}130\text{ cm}^{-1}$ , que bordea la región de

microondas, se considera la región de terahercios y puede sondear vibraciones intermoleculares.

El espectro infrarrojo de una muestra se registra haciendo pasar un haz de luz infrarroja a través de la muestra. Cuando la frecuencia del IR es la misma que la frecuencia vibratoria de un enlace o colección de enlaces, se produce la absorción. El examen de la luz transmitida revela cuánta energía fue absorbida en cada frecuencia (o longitud de onda). Esta medición se puede lograr escaneando el rango de longitud de onda utilizando un monocromador. Alternativamente, todo el rango de longitud de onda se mide utilizando un instrumento de transformada de Fourier y luego se genera un espectro de transmitancia o absorbancia utilizando un procedimiento dedicado.

Esta técnica se utiliza comúnmente para analizar muestras con enlaces covalentes. Los espectros simples se obtienen de muestras con pocos enlaces activos IR y altos niveles de pureza. Las estructuras moleculares más complejas conducen a más bandas de absorción y espectros más complejos.

### **10.3. Análisis de termogravimetría (TGA)**

El análisis termogravimétrico es un método de análisis térmico en el que la masa de una muestra se mide a lo largo del tiempo a medida que cambia la temperatura. Esta medida proporciona información sobre fenómenos físicos, como transiciones de fase, absorción, adsorción y desorción; así como fenómenos químicos que incluyen quimisorciones, descomposición térmica y reacciones sólido-gas (por ejemplo, oxidación o reducción).

El análisis termogravimétrico (TGA) se lleva a cabo en un instrumento denominado analizador termogravimétrico. Un analizador termogravimétrico mide continuamente la masa mientras la temperatura de una muestra cambia con el tiempo. La masa, la temperatura y el tiempo se consideran medidas básicas en el análisis termogravimétrico, mientras que muchas medidas adicionales pueden derivarse de estas tres medidas básicas.

Un analizador termogravimétrico típico consiste en una balanza de precisión con un plato de muestra ubicado dentro de un horno con una temperatura de control programable. La temperatura generalmente aumenta a una velocidad constante (o para algunas aplicaciones, la temperatura se controla para una pérdida de masa constante) para provocar una reacción térmica. La reacción térmica puede ocurrir bajo una variedad de atmósferas que incluyen: aire ambiente, vacío, gas inerte, gases oxidantes/reductores, gases corrosivos, gases carburantes, vapores de líquidos o "atmósfera autogenerada"; así como una variedad de presiones que incluyen: alto vacío, alta presión, presión constante o presión controlada.

Los datos termogravimétricos recopilados de una reacción térmica se compilan en un gráfico de masa o porcentaje de masa inicial en el eje y frente a la temperatura o el tiempo

en el eje x. Este gráfico, que a menudo se suaviza, se denomina curva TGA. La primera derivada de la curva TGA (la curva DTG) se puede trazar para determinar puntos de inflexión útiles para interpretaciones en profundidad, así como análisis térmico diferencial (Coats & Redfern, 1963).

---

## Referencias

- Alay, S., Alkan, C., & Göde, F. (2011). Synthesis and characterization of poly(methyl methacrylate)/n-hexadecane microcapsules using different cross-linkers and their application to some fabrics. *Thermochimica Acta*, 518(1–2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.01.014>
- Alvarez, V. A., Muñoz, V., Gonzalez, J. S., & Martinez, M. A. (2017). Functional Textiles for Skin Care by Active Substance Encapsulation. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00082>
- Bindel, J. B. (1992). SEM: Scanning Electron Microscopy. *Encyclopedia of Materials Characterization*, 70–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052360-6.50011-4>
- Borrero, A. (1979). *Propiedades físicas y químicas del algodón*.
- Buryaile, R., Urriza, L. M., Negri, R., Garcarena, I. M., Córdoba, S. N., Di Cecco, D., & Cuesta, F. (2017). *Perspectivas de la demanda de fibras textiles*.
- Casanova, F., & Santos, L. (2016). Encapsulation of cosmetic active ingredients for topical application-a review. In *Journal of Microencapsulation* (Vol. 33, Issue 1, pp. 1–17). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.3109/02652048.2015.1115900>
- Chen, C., Wang, L., & Huang, Y. (2007). Electrospinning of thermo-regulating ultrafine fibers based on polyethylene glycol/cellulose acetate composite. *Polymer*, 48(18), 5202–5207. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.06.069>
- Coats, A. W., & Redfern, J. P. (1963). Thermogravimetric analysis. A review. *Analyst*, 88(1053), 906–924. <https://doi.org/10.1039/AN9638800906>
- Das, S., Paul, D., Hasan, S., Chowdhury, N., & Nizam, Md. E. H. (2013). *Smart Textiles-New Possibilities in Textile Engineering*.
- Fang, Y., Kuang, S., Gao, X., & Zhang, Z. (2008). Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3704–3707. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.027>
- Findlay, C. (2018). *Development of FTIR tomography for thermal-source imaging of 3D biochemical distributions in micro-samples of cells and fibers*. [https://doi.org/10.5203/THESIS\\_FINDLAY\\_1](https://doi.org/10.5203/THESIS_FINDLAY_1)
- Floros, M. (2016). Designing Superior Phase-Change Materials from Lipids. In *INFORM: International News on Fats, Oils, and Related Materials* (Vol. 27, pp. 10–13). <https://doi.org/10.21748/inform.09.2016.10>
- Ghayempour, S., & Mortazavi, S. M. (2015). Microwave curing for applying polymeric nanocapsules containing essential oils on cotton fabric to produce antimicrobial and fragrant textiles. *Cellulose*, 22(6), 4065–4075. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0765-1>

- 
- Ghosh, S. K. (2006). *Functional Coatings: By Polymer Microencapsulation*. Wiley-VCH.
- He, B., & Setterwall, F. (2002). Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage and cool storage systems capital cost estimation. *Energy Conversion and Management*, 43(13), 1709–1723. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00005-X)
- Hosne Asif, A. K. M. A., & Hasan, Md. Z. (2018). Application of Nanotechnology in Modern Textiles: A Review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 8(02). <https://doi.org/10.14741/IJCET/V.8.2.5>
- Hu, J., Meng, H., Li, G., & Ibekwe, S. I. (2012). A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications. *Smart Materials and Structures*, 21(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/5/053001>
- Hughes-Riley, T., Dias, T., & Cork, C. (2018). A Historical Review of the Development of Electronic Textiles. *Fibers*, 6(2), 34. <https://doi.org/10.3390/fib6020034>
- Interempresas. (2017, March 2). *Textiles inteligentes con material de cambio de fases (PCM), entre la oferta de Tectextil*. [https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/212875-Textiles-inteligentes-con-material-de-cambio-de-fases-\(PCM\)-entre-la-oferta-de-Tectextil.html](https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/212875-Textiles-inteligentes-con-material-de-cambio-de-fases-(PCM)-entre-la-oferta-de-Tectextil.html)
- ISO. (2010). *ISO - ISO 105-C06:2010 - Textiles — Tests for colour fastness — Part C06: Colour fastness to domestic and commercial laundering*.
- Joshi, M., & Adak, B. (2019). Advances in Nanotechnology Based Functional, Smart and Intelligent Textiles: A Review. In *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology* (pp. 253–290). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.10471-0>
- Khan, A., & Nahid Pervez, M. (2015). A Study on Phase Change Material with Reference to Thermal Energy Storage by Using Polyethyleneglycol-1000 to Create Thermo-Regulating Fabric. *International Journal of Textile Science*, 4(3), 53–59. <https://doi.org/10.5923/j.textile.20150403.01>
- Koncar, V. (2016). Introduction to smart textiles and their applications. In *Smart Textiles and Their Applications* (pp. 1–8). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00001-1>
- Konuklu, Y., Paksoy, H. O., & Unal, M. (2015). Nanoencapsulation of n-alkanes with poly(styrene-co-ethylacrylate) shells for thermal energy storage. *Applied Energy*, 150, 335–340. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.11.066>
- Koo, K., Park, Y., Choe, J., & Kim, E. (2008). The application of microencapsulated phase-change materials to nylon fabric using direct dual coating method. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(4), 2337–2344. <https://doi.org/10.1002/app.27634>
- MarketsandMarkets. (2021). *Smart Textiles Market with COVID-19 impact analysis by Type (Passive, Active/Ultra-smart), Function (Sensing, Energy Harvesting & Thermo-electricity, Luminescence & Aesthetics), Vertical, & Geography - Global Forecast to 2026*.
-

- 
- [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-textiles-market-13764132.html?gclid=EAlaIqobChMIImOCcmeGR6AIVx0XVCh1nRAZtEAAYASAAEgILfD\\_BwE](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-textiles-market-13764132.html?gclid=EAlaIqobChMIImOCcmeGR6AIVx0XVCh1nRAZtEAAYASAAEgILfD_BwE)
- Matsuo, T. (2008). Advanced technical textile products. *Textile Progress*, 40(3), 123–181. <https://doi.org/10.1080/00405160802386063>
- Mejía-Azcárete, F. (2015). Textiles Inteligentes - Prendas para todos los climas. In *Programa de Textilización - Ciencias Textiles* (6th ed.). Philadelphia Textile University. <https://programadetextilizacion.blogspot.com/>
- Meng, Q., Li, G., & Hu, J. (2015). Phase Change Fibers and Assemblies. In *Handbook of Smart Textiles* (pp. 225–251). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1_2)
- Mishra, R., & Militky, J. (2019). Nature, nanoscience, and textile structures. *Nanotechnology in Textiles*, 1–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102609-0.00001-8>
- Mochane, M. J., & Luyt, A. S. (2012). Preparation and properties of polystyrene encapsulated paraffin wax as possible phase change material in a polypropylene matrix. *Thermochimica Acta*, 544, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.06.017>
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles - An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28(11–12), 1536–1550. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.08.009>
- Montazer, M., & Harifi, T. (2018). Nanoencapsulation techniques for textile finishing. In *Nanofinishing of Textile Materials* (pp. 295–310). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101214-7.00019-4>
- Nagano, K., Mochida, T., Takeda, S., Domański, R., & Rebow, M. (2003). Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, 23(2), 229–241. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00161-8)
- Nasif Chowdhury, & Subrata Chandra Das. (2015). Application of Nanotechnology in Textiles: A Review. *Scientific Research Journal*, 43(5), 44–49.
- Neal Cox, J. (1992). FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Encyclopedia of Materials Characterization*, 416–427. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052360-6.50041-2>
- Nelson, G. (2013). Microencapsulated colourants for technical textile application. In *Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles* (pp. 78–104). <https://doi.org/10.1533/9780857097613.1.78>
- Pan, N., & Sun, G. (2011). *Functional textiles for improved performance, protection and health*. Elsevier.
- Pause, B. (2003). Nonwoven Protective Garments with Thermo-Regulating Properties. *Journal of Industrial Textiles*, 33(2), 93–99. <https://doi.org/10.1177/152808303038859>
-

- 
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. In *Progress in Materials Science* (Vol. 65, pp. 67–123). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>
- Preet Kaur, L., Sharma, S., & Kumar Guleri, T. (2013). MICROENCAPSULATION: A NEW ERA IN NOVAL DRUG DELIVERY. *Loveleen Preet Kaur, IJPRBS*, 2(2), 456–468.
- Quandt, B. M., Braun, F., Ferrario, D., Rossi, R. M., Scheel-Sailer, A., Wolf, M., Bona, G.-L., Hufenus, R., Scherer, L. J., & Boesel, L. F. (2017). Body-monitoring with photonic textiles: a reflective heartbeat sensor based on polymer optical fibres. *Journal of The Royal Society Interface*, 14(128). <https://doi.org/10.1098/RSIF.2017.0060>
- Salaün, F., Devaux, E., Bourbigot, S., & Rumeau, P. (2010). Thermoregulating response of cotton fabric containing microencapsulated phase change materials. *Thermochimica Acta*, 506(1–2), 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.04.020>
- Sánchez, L., Lacasa, E., Carmona, M., Rodríguez, J. F., & Sánchez, P. (2008). Applying an experimental design to improve the characteristics of microcapsules containing phase change materials for fabric uses. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(23), 9783–9790. <https://doi.org/10.1021/ie801107e>
- Sánchez, P., Sánchez-Fernandez, M. V., Romero, A., Rodríguez, J. F., & Sánchez-Silva, L. (2010). Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. *Thermochimica Acta*, 498(1–2), 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.09.005>
- Sánchez-Silva, L., Rodríguez, J. F., Romero, A., Borreguero, A. M., Carmona, M., & Sánchez, P. (2010). Microencapsulation of PCMs with a styrene-methyl methacrylate copolymer shell by suspension-like polymerisation. *Chemical Engineering Journal*, 157(1), 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.013>
- Sarif Ullah Patwary, M. S. (2015). Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. *Journal of Textile Science & Engineering*, 05(01), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000181>
- Schneegass, S., & Amft, O. (2017). *Smart Textiles fundamentals, design, and interaction*. February, 397. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50124-6>
- Serna, L. P. (2010). *Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena fibra-textil-confecciones: mapa tecnológico estratégico, nuevos escenarios para el futuro de la cadena productiva fibra-textil-confección de Colombia*. Universidad del Rosario.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Issue 2, pp. 318–345). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Shchukina, E. M., Graham, M., Zheng, Z., & Shchukin, D. G. (2018). Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 47, Issue 11, pp. 4156–4175). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8cs00099a>
-

- 
- Shin, Y., Son, K., & Yoo, D. I. (2010). Development of natural dyed textiles with thermo-regulating properties. *Thermochimica Acta*, 511(1–2), 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.07.016>
- Silva, M. L. S. (2009). *Microencapsulación de materiales de cambio de fase para su aplicación textil*. <http://hdl.handle.net/10578/2269>
- Statista Research Department. (2020, March 9). *Smart clothing/fabric market size worldwide 2018–2025*. <https://www.statista.com/statistics/302735/smart-clothing-fabrics-shipments-worldwide/>
- Tan, J. (2015). Photonic fabrics for fashion and interior. *Handbook of Smart Textiles*, 1005–1033. [https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1_29)
- Tang, S. L. P., & Stylios, G. K. (2006). An overview of smart technologies for clothing design and engineering. In *International Journal of Clothing Science and Technology* (Vol. 18, Issue 2, pp. 108–128). Emerald Group Publishing Limited.  
<https://doi.org/10.1108/09556220610645766>
- Tao, X. (2015). Handbook of smart textiles. In *Handbook of Smart Textiles*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1>
- Xiaopei Wu, J., & Li, L. (2019). An Introduction to Wearable Technology and Smart Textiles and Apparel: Terminology, Statistics, Evolution, and Challenges. In *Smart and Functional Soft Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86560>
- Yang, K., Jiao, M., Wang, S., Yu, Y., Diao, Q., & Cao, J. (2018). Thermoregulation properties of composite phase change materials in high temperature environmental conditions. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 30(4), 507–516.  
<https://doi.org/10.1108/IJCST-11-2017-0173>
- Yetisen, A. K., Qu, H., Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Hinestroza, J. P., Skorobogatiy, M., Khademhosseini, A., & Yun, S. H. (2016). Nanotechnology in Textiles. In *ACS Nano* (Vol. 10, Issue 3, pp. 3042–3068). American Chemical Society.  
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b08176>