



SEP  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Sincronización de reactores por lotes para disminuir el ciclo productivo  
y el uso de compuestos químicos adicionales”**

**Alumno responsable: Citlali Herrera Robles**

**Línea de investigación o de trabajo: Control de Sistemas  
Ambientales**

**Comité Tutorial**

**Director: Dr. Sergio Valle Cervantes**

**Asesores: M.C Rafael Lucho Chigo**

**Dr. Armando de la Peña Arellano**

**M.I Ma. Dolores Josefina Rodríguez Rosales**

FECHA DE ELABORACIÓN

04

DÍA

06

MES

2019

AÑO

“Sincronización de reactores por lotes para disminuir el ciclo productivo y el uso de compuestos químicos adicionales”

Por

Citlali Herrera Robles

## **COMITÉ TUTORIAL**

### **DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Sergio Valle Cervantes

---

### **ASESORES**

M.I. María Dolores Josefina Rodríguez Rosales

---

M.C Rafael Lucho Chigo

---

Dr. Armando de la Peña Arellano

---



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Victoria de Durango, Dgo., a **04 / Octubre / 2019.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 442 / 19.

**ASUNTO:** Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

**I.Q. CITLALI HERRERA ROBLES**  
**No. DE CONTROL G11041187**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales** cuyo título es:

**"SINCRONIZACIÓN DE REACTORES POR LOTES PARA DISMINUIR EL CICLO PRODUCTIVO Y EL USO DE COMPUESTOS QUÍMICOS ADICIONALES"**

**CONTENIDO:**

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sin otro asunto en particular, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE.**

*"La Técnica al Servicio de la Patria"*

**C. LUZ ARACELI OCHOA MARTÍNEZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



LAOM'ammc.



Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, C.P. 34080

Durango, Durango. Tel (618) 829-0900

www.tecnm.mx | www.itdurango.edu.mx



Fecha de Emisión: 05/10/19  
Fecha de Validación: 05/10/19  
Fecha de Expiración: 05/10/20  
Fecha de Revalidación: 05/10/20



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO.

Instituto Tecnológico de Durango

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Victoria de Durango, Dgo., a **04 / Octubre / 2019.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 443 / 19.

**ASUNTO:** Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**I.Q. CITLALI HERRERA ROBLES**  
**No. DE CONTROL G11041187**  
**P R E S E N T E .**

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

**"SINCRONIZACIÓN DE REACTORES POR LOTES PARA DISMINUIR EL CICLO PRODUCTIVO Y EL USO DE COMPUESTOS QUÍMICOS ADICIONALES"**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**A T E N T A M E N T E .**

*"La Técnica al Servicio de la Patria"*

**C. LUZ ARACELI OCHOA MARTÍNEZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**ITD** INSTITUTO TECNOLÓGICO  
de Durango  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

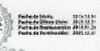
LAOM'ammc.



Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, C.P. 34080

Durango, Durango. Tel (618) 829-0900

www.tecnm.mx | www.itdurango.edu.mx



## **Dedicatoria**

### *A mis padres*

No hay nada que no pueda lograr si cuento con su apoyo incondicional y su maravilloso ejemplo de superación. Sabiendo que no hay palabras que puedan expresar el agradecimiento que tengo, deseo hacerles saber que todos mis logros también son suyos. Con mucho cariño, admiración y respeto.

### *A mi hijo*

Eres la inspiración y el motor más grande en mi vida, todo esto es por y para ti.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante la realización del proyecto. A mi alma máter, el Instituto Tecnológico de Durango, por permitirme continuar mis estudios de maestría en tan prestigiosa institución.

A la empresa ARAUCO S.A de C.V por recibirme en sus instalaciones para obtener la información necesaria, así como al personal operativo por su buena disposición en la etapa de monitoreo para tener un mejor entendimiento del proceso sobre el cual se trabajó.

A mi comité tutorial, por sus consejos a lo largo de mi estancia en la Unidad de Posgrado, Investigación y Desarrollo Tecnológico (UPIDET). Quiero agradecer especialmente a mi director, el Doctor Sergio Valle Cervantes por invitarme a ser parte de la maestría, por compartir sus conocimientos y sobre todo por inculcarme el gusto por la investigación.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos y familiares, por darme su apoyo incondicional en todo momento. Gracias por la ayuda, los consejos y la paciencia que recibí de ustedes siempre que lo necesité.

## RESUMEN

En esta tesis se utiliza una técnica de sincronización empleada en distintos procesos. Dicha técnica se denomina alineación dinámica del tiempo (DTW, por sus siglas en inglés). La sincronización que se presenta se realizó en un sistema productivo de resinas urea- formaldehído (UF) para la fabricación de tableros. El sistema opera de manera intermitente, es decir, en cada ciclo de operación se obtiene un lote de resina. Por otro lado, el proceso es semi automático, motivo por el cual se tienen variaciones entre lote y lote, por lo tanto, los tiempos de ciclo varían.

La sincronización de un proceso intermitente es de suma importancia ya que este tipo de procesos es muy usado en distintas ramas de la industria. Actualmente existen distintas técnicas de sincronización, sin embargo, para este caso de estudio la mejor opción es DTW, ya que se tienen vectores de longitud en las variables consideradas.

Una parte importante en el presente trabajo es el monitoreo ya que es la forma de obtener información necesaria para la posterior sincronización. Al monitorear distintos lotes de resina es posible obtener datos para el mejor entendimiento del proceso. Por otro lado, es posible conocer las variables con las que se va a trabajar y sus rangos de operación. Los datos de la resina monitoreada se obtuvieron de la empresa ARAUCO S.A de C.V ubicada en Carretera Panamericana km 959, en la ciudad de Durango. En la empresa se presentan algunas complicaciones en cuanto a tiempos de ciclo o variaciones que pueden afectar en la calidad del producto final e incluso se pueden generar productos fuera de especificación. Es por esto que se desea hacer una sincronización que permita disminuir dichas problemáticas.

En la sincronización se pretende obtener una ruta óptima, para así disminuir variaciones entre lotes. Dicha ruta servirá de referencia a la hora de fabricar la resina, así como conocer límites máximos y mínimos. Por otro lado, al tener lotes sincronizados, se disminuye el uso de sustancias químicas empleadas para regular el pH, lo cual beneficia al medio ambiente. Después de dar un pre tratamiento estadístico a los datos obtenidos, fue posible realizar la sincronización usando DTW en el software R Studio.

## ABSTRACT

In this thesis, a synchronization technique used in different processes is presented. This technique is called dynamic time warping (DTW). The synchronization presented was carried out in a production system of urea – formaldehyde (UF) resins for the manufacture of boards. The system operates intermittently, that is, in each cycle a resin batch is obtained. On the other hand, the process is semi-automatic, which is why there are batch to batch variations, therefore, cycle times vary.

The synchronization of an intermittent process is very important since this type of process is widely used in different branches of the industry. There are currently different synchronization techniques, however, for this case of study, the best option is DTW since there are vectors of length in the variables considered.

An important part of this work is monitoring since it is the way to obtain information necessary for subsequent synchronization. By monitoring different batches of resin it is possible to obtain data for a better understanding of the process. On the other hand, it is possible to know the variables to work with and their operating ranges. The data of the monitored resin was obtained from the company ARAUCO S.A de C.V located at Carretera Panamericana km 959, in Durango city. In the company there are some complications in terms of cycle times or variations that can affect the quality of the final product and even products out of specification can be generated. That is why it is necessary to make a synchronization that allows reducing these problems.

It is intended to obtain an optimal route, to reduce variations between batches. This route will serve as a reference when manufacturing the resin, as well as knowing maximum and minimum limits. On the other hand, by having synchronized batches, the use of chemical substances used to regulate pH is reduced, which benefits the environment. After giving a statistical pre-treatment to the data obtained, it was possible to make a synchronization using the R Studio software.

## INDICE

<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo general	4
1.4 Objetivos específicos	4
1.5 Descripción del contenido de cada capítulo	4
<b>CAPITULO II. MARCO TEORICO</b>	5
2.1 Procesos por lotes	6
2.2 Resinas de urea formaldehido (UF)	7
2.2.1 Reacción urea formaldehido	8
2.2.2 Formaldehido	10
2.3 Sincronización	11
2.4 Ajuste dinámico del tiempo (dynamic time warping)	12
2.5 Proceso de producción de resinas	14
<b>CAPITULO III. METODOLOGÍA</b>	16
3.1 Proceso de producción de resinas	17
3.2 Monitoreo	19
3.2 Análisis preliminar de datos	20
3.2.1 Trayectorias de igual longitud	20
3.3 Sincronización	20
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	24
4.1 Resultados en el monitoreo	25
4.2 Resultados de análisis preliminar de datos	27
4.3 Resultados de la sincronización	32
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	34
5.1 Conclusiones	35
5.2 Recomendaciones	36
Bibliografía	37

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Parámetros a considerar en un proceso intermitente	6
<b>Tabla 2.2</b> Ventajas y desventajas de las resinas UF	7
<b>Tabla 4.1</b> Primer conjunto de lotes monitoreados	25
<b>Tabla 4.2</b> Segundo conjunto de lotes monitoreados	25
<b>Tabla 4.3</b> Datos de un lote monitoreado	26

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Reacción urea- formaldehído	8
<b>Figura 2.2</b> Reacción de hidroximetilación	9
<b>Figura 2.3</b> Alineamiento de dos trayectorias desiguales usando DTW	13
<b>Figura 3.1</b> Proceso productivo de resinas	19
<b>Figura 3.2</b> Ejemplo de DTW	21
<b>Figura 3.3</b> Paquetes de R Studio	22
<b>Figura 3.4</b> R Studio	23
<b>Figura 4.1</b> Perfiles de temperatura con distintas longitudes	28
<b>Figura 4.2</b> Perfiles de pH con distintas longitudes	29
<b>Figura 4.3</b> Perfiles de viscosidad con distintas longitudes	29
<b>Figura 4.4</b> Límites de temperatura, pH y viscosidad	30
<b>Figura 4.5</b> Perfiles de las variables con longitudes iguales	31
<b>Figura 4.6</b> Variables sincronizadas usando DTW	32
<b>Figura 4.7</b> Temperatura vs pH	33

# Capítulo I. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El uso e interpretación de datos se ha vuelto una herramienta muy importante a la hora de detectar e identificar fallas en cualquier proceso. Dichos datos han sido empleados de manera efectiva para control de procesos, esto a través de técnicas matemáticas y estadísticas como la descomposición de valores singulares (SVD por sus siglas en inglés) o análisis de componente principal (PCA).

En años recientes se han aplicado distintas técnicas de manejo de datos, Morones (2008) empleó la técnica alineamiento temporal DTW, para la sincronización de la reacción urea-formaldehído (UF) en la producción de adhesivos de madera. El objetivo de la metodología es encontrar la trayectoria óptima del proceso, por lo que fue necesario monitorear 45 lotes de resinas UF, para que fuera posible alinear lotes con longitudes desiguales tomando en cuenta que hay eventos en el proceso que ocurren simultáneamente y que el algoritmo necesita ser aplicado a trayectorias multivariadas.

Una de las metodologías más empleadas en sincronización es Análisis de Componente Principal (PCA por sus siglas en inglés). Qin y Cherry (2005) combinaron PCA Y DTW para sincronizar reactores por lotes. Los datos empleados fueron sometidos a un pre tratamiento con el fin de trasladar dichos datos en un vector que posteriormente es analizado. Para que la sincronización fuera posible se empleó la interpolación lineal y DTW ya que son métodos relativamente simples. En el estudio se demostró que tanto la interpolación lineal como DTW son métodos efectivos para procesar datos que pueden ser analizados con la técnica PCA durante el monitoreo batch.

Wan *et al.*,(2014)alinearon trayectorias desiguales usando una técnica que identifica modelos de PCA y PLS (mínimos cuadrados parciales) al inicio y después los aplica para extender las trayectorias más cortas y predecir la calidad del producto final. Las trayectorias pueden ser alineadas para ser de una longitud específica usando ventanas móviles de estimación.

(Pravdova, *et al.*, 2002) probaron y compararon dos técnicas de alineación: ajuste dinámico del tiempo (DTW) y correlación optimizada de ajuste (COW,

por sus siglas en inglés). Dicho estudio se realizó en perfiles de cromatografía y espectroscopía. Aunque la elección del método depende del problema que se tenga, concluyeron que DTW y COW son herramientas útiles para alinear distintos tipos de señales. Se demostró que, para algunos casos, la distancia no es la mejor medida de similitud para alineación. COW ofrece una mejor medida de similitud; pero aún existen algunas limitaciones. Sin embargo, los métodos de deformación hacen posible usar técnicas de pre tratamiento estándar para un posterior análisis.

## **1.2 Justificación**

ARAUCO es una empresa líder en la fabricación de resinas fenólicas, ureicas y melamínicas. Al preocuparse por el medio ambiente, está en la búsqueda de un proyecto de investigación que permita aumentar la producción de resinas, así como evitar que se generen productos fuera de especificación. Al evitar o reducir dichos productos no deseados se está generando un impacto positivo en el medio ambiente, ya que se evita la generación de químicos difíciles de tratar, que por su difícil disposición tienen que ser trasladados a otras partes del país para su correcto tratamiento y disposición final. La importancia e impacto del proyecto es mayor si se considera que la empresa cuenta con 2 reactores de 35 toneladas de capacidad cada uno para producir resinas ureicas, en particular las de tipo 8126.

Las resinas son producidas por medio de un proceso intermitente, el cual se caracteriza por presentar variaciones ya que no operan en estado continuo y su duración no siempre es la misma. Al no contar con un mecanismo de monitoreo en dicho proceso, se tiene un impacto en la economía de la planta en términos de tiempo, materia prima y energía, por lo que es importante aplicar una técnica de monitoreo que permita sincronizar el proceso para así obtener un tiempo de ciclo adecuado.

### **1.3 Objetivo general**

Mejorar el ciclo de producción de resinas UF para disminuir tiempos de operación y el uso de compuestos adicionales como ácido fórmico y sosa para que la resina final tenga las características deseadas.

### **1.4 Objetivos particulares**

- Aplicar una herramienta matemática novedosa para la empresa que permita mejorar el rendimiento y disminuir productos fuera de especificación.
- Trasladar la metodología de mejora a una herramienta accesible a los operadores.

### **1.5 Descripción del contenido de cada capítulo**

En el capítulo I se hace una breve introducción al proyecto de investigación. Se mencionan algunos métodos empleados anteriormente para resolver problemáticas similares a las que en este trabajo se presentan. Por otro lado, se plantean los objetivos general y específicos del mismo. En el capítulo II se describe el marco teórico de cada uno de los temas que abarca el proyecto de investigación. Se abarca desde los procesos por lotes hasta el proceso de sincronización que se va a emplear. Por otro lado, se explica de manera general el proceso productivo con el que se trabajó en dicho proyecto. El tercer capítulo está dedicado a la metodología que se llevó a cabo. De manera general, se explica el monitoreo, el análisis preliminar de los datos y la sincronización. Finalmente, en el capítulo V se muestran los resultados obtenidos, desde el monitoreo hasta la sincronización y gráficos que muestran comportamientos de las variables y que servirán directamente a los operadores de la empresa de resinas.

## **Capítulo II. Marco teórico**

## 2.1 Procesos por lotes

Los procesos intermitentes son dominantes en industrias como farmacéutica, química, polímeros, industria alimenticia, etc. Estos procesos tienen un inicio y un final definido con una serie de pasos o tareas para realizar con condiciones de operación y tiempos de procesamientos fijos (Ela y Ketan, 2013).

Un proceso es el conjunto de actividades u operaciones que modifican materias primas (entradas) para obtener un producto con valor agregado (salidas), con el fin de satisfacer una necesidad. En ingeniería existen procesos continuos y discontinuos o por lotes (batch) que es el proceso de interés en este caso. Un proceso intermitente es aquel que tiene una duración finita, que consta básicamente de tres pasos: carga de  $n$  números de reactivos, proceso de reacción bajo condiciones de operación específicas y descarga del producto con las características deseadas.

Por otro lado, muchos de los procesos químicos son iniciados con una operación tipo intermitente hasta que la producción crezca y se pueda justificar la compra de otros equipos especializados para producir el producto. En un proceso intermitente se llevan a cabo operaciones físicas o químicas dentro del reactor y opera de acuerdo a una receta específica. De acuerdo con Rodríguez (2013), la forma de preparar un producto y el modo de operación son factores importantes a considerar en un proceso intermitente. A continuación, se explican dichos factores en la Tabla 2.1.

*Tabla 2.1 Parámetros a considerar en un proceso intermitente*

<b>Forma de preparar un producto</b>	<b>Receta por lotes.</b> Parámetros, cantidades de productos químicos, tiempo y un perfil de condiciones de operación relacionadas con el tiempo.
	<b>Secuencia.</b> Define todos los estados necesarios del proceso y el orden en el cual los estados deben proseguir.
<b>Modos básicos de operación</b>	<b>Manual.</b> La secuencia es dada por el operador
	<b>Semi automático.</b> La secuencia es iniciada por el operador, pero luego el proceso continúa de manera automática.
	<b>Automático.</b> Cada una de las secuencias es inicializada, o se puede repetir sin intervención del operador.

El monitoreo de procesos intermitentes es particularmente importante para asegurar una alta calidad de los productos finales, como farmacéuticos, semi conductores y polímeros, por lo tanto, se ha atraído la atención de muchos investigadores. Entre varios métodos de monitoreo, como el monitoreo de procesos estadísticos impulsado por datos (SPM por sus siglas en inglés) han sido desarrollados rápidamente debido a su flexibilidad (Wang & Yao, 2015).

## 2.2 Resinas de Urea Formaldehído (UF)

Las resinas de urea formaldehído (UF) son una clase de polímeros de condensación que se emplean como resinas sintéticas obtenidas a través de la reacción entre la urea: un cristal sólido que se obtiene a partir del amoníaco, y del formaldehído: un gas altamente reactivo obtenido a partir del metanol, que suele ser catalizada por cloruro de amonio (Vallejos, 2010).

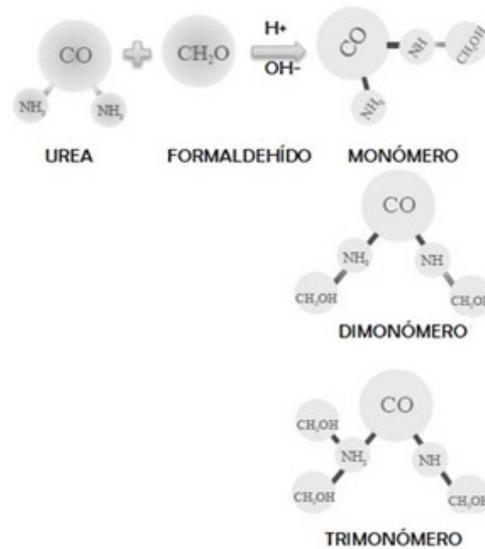
Las resinas UF atraen mucho interés porque tienen gran importancia comercial y son fáciles de fabricar a bajos costos, especialmente como adhesivos para productos de metal, plástico y madera. Algunas de las ventajas y desventajas según (Bolívar, 2012) se muestran en la Tabla 2.2.

*Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de las resinas UF*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de producción</li> <li>• Posibilidad de entrecruzamiento en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones.</li> <li>• Solubilidad en agua.</li> <li>• Resistencia a los microorganismos y a la abrasión.</li> <li>• Resistencia térmica.</li> <li>• Transparencia y ausencia de color una vez curados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones de formaldehído como consecuencia de la reversibilidad de las reacciones de síntesis y entrecruzamiento.</li> <li>• No tienen resistencia al clima.</li> <li>• Limitada resistencia a la humedad.</li> </ul>

### 2.2.1 Reacción urea-formaldehído

Las resinas UF se basan en la reacción de dos monómeros: urea y formaldehído (Fig. 2.1). Se pueden obtener distintas estructuras dependiendo de las condiciones de reacción y especificaciones de la resina. Dicha reacción consta básicamente de dos pasos: una metilolación alcalina y una condensación ácida. El primero se refiere a la adición de hasta tres moléculas de formaldehído bifuncional a una molécula de urea para producir así las llamadas metilolureas (Dunky, 1998).



**Figura 2.1** Reacción urea- formaldehído

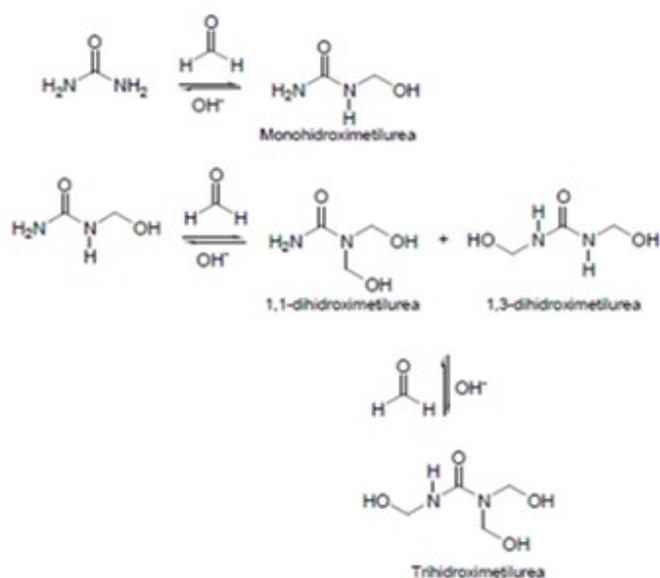
De acuerdo con (Bolívar, 2012) el proceso de fabricación de una resina UF consta de varias etapas. A continuación, se describe cada una de ellas.

La primera etapa, también llamada hidroximetilación, consiste en la condensación alcalina entre la urea y el formaldehído. Aquí se generan distintas especies hidroximetilurea: monohidroximetilurea (MU), 1,3- dihidroximetilurea (1,3 DMU), 1,1- dihidroximetilurea (1,1- DMU) y trihidroximetilurea (TMU) fundamentalmente (Figura 2.2).

La siguiente etapa es la condensación ácida entre las especies hidroximetilurea, originando las moléculas poliméricas. Esta es una etapa crítica del proceso, porque hay que evitar favorecer la formación de enlaces étermetileno con respecto a los aminometileno y hay que controlar en grado de

condensación, porque el aumento de éste conduce a un incremento de moléculas de resina de alto peso molecular, que provocan la disminución de la solubilidad de la resina en agua.

La etapa siguiente es la segunda adición de urea, que se realiza para disminuir la relación molar formaldehído-urea (F/U) y obtener la resina. Ésta reacción se lleva a cabo en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino y temperaturas moderadas. La urea reacciona con el formaldehído libre, para formar nuevamente especies hidroximetilurea y con los grupos hidroximetilo de las cadenas poliméricas. En esta etapa ocurre el fenómeno de la transhidroximetilación, es decir, la migración de los grupos hidroximetilo de las cadenas poliméricas.



**Figura 2.2** Reacción de hidroximetilación

Finalmente, se da el proceso de curado: el propósito final de la síntesis consiste en la obtención de una resina con cantidades óptimas de polímero, prepolímero y monómeros, con un contenido apropiado de grupos funcionales, que debería garantizar una alta estabilidad y curado y mínima emisión de formaldehído.

### 2.2.2 Formaldehído

El formaldehído es un compuesto químico orgánico perteneciente al grupo de los aldehídos, altamente inflamable y muy volátil. En condiciones normales de presión y temperatura es un gas, de olor fuerte y penetrante, muy soluble al agua. Cabe mencionar que el formaldehído es uno de los compuestos básicos más importantes de la industria química y su producción mundial anual es de unos 21 millones de toneladas.

Como se mencionó anteriormente, la principal desventaja de las resinas UF son las emisiones de formaldehído, que dañan al medio ambiente y a la salud. Sin embargo, no siempre se ha tenido conciencia de este problema: a mediados de los años 60 sólo se sabía que causa irritación de los ojos y vías respiratorias. En Estados Unidos, en el año 1987 la Agencia de Protección Ambiental (EPA) clasificó al formaldehído como “probable cancerígeno humano bajo condiciones de exposición inusualmente altas o prolongadas”. En el año 2006, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasificó al formaldehído como “cancerígeno humano” y en el año 2011, el Programa Nacional de Toxicología, indicó que el formaldehído es un “cancerígeno humano conocido”

### **2.3 Sincronización**

En los procesos batch generalmente ocurren variaciones de un lote a otro, como pueden ser errores en la carga de materias primas, así como anomalías o impurezas en las mismas, fallas en equipos o incluso errores operativos. Dichas condiciones anormales pueden ocasionar que un lote o una secuencia de ellos generen productos de baja calidad, así como cambios en la trayectoria de los lotes. El problema es mayor si no se detecta a tiempo y a pesar de esto, muchas industrias no cuentan con un monitoreo en tiempo real que asegure que el proceso fluya correctamente.

Por otro lado, se han realizado algunos esfuerzos en la industria para usar bases de datos para tratar de descubrir atributos particulares de la medición de trayectorias, tales como tiempos de abertura de válvulas o límites máximos de temperatura o presión durante un intervalo, que aparente afectar la calidad del producto y después monitorear dichos atributos (Nomikos, MacGregor ,1995))

Perturbaciones y cambios en las condiciones de operación y materias primas pueden llevar fácilmente a lotes de diferente longitud, así como a fin de cumplir los requisitos de calidad especificados al final de la corrida del lote. Así que es necesario alinear los datos de los lotes desiguales para usarlos en el proceso de monitoreo y control (Wan *et al.*, 2014).

Existen distintas metodologías para llevar a cabo una sincronización de batch de diferentes longitudes. En los casos más simples donde las trayectorias coinciden en tiempos comunes, las trayectorias pueden cortarse a la mínima longitud o extenderse a la máxima por medio de algoritmos. Otro enfoque para llevar a cabo la sincronización consiste en encontrar una variable que pueda sustituir la dimensión temporal, sin embargo, es difícil encontrar una variable que sea estrictamente monótonica y que tenga los mismos valores iniciales y finales. Las trayectorias desiguales también pueden ser sincronizadas expandiendo o contrayendo algunos segmentos; algunas metodologías de este tipo de sincronización son la correlación optimizada de deformación (COW, por sus siglas en inglés), y el cambio dinámico del tiempo (DTW).

Muchos de los métodos empleados para la sincronización de reactores por lotes asumen que todas las trayectorias tienen la misma longitud, sin embargo, existen situaciones en las que la duración de los lotes o de alguna de sus etapas no es igual. Lo anterior se repite mayormente en aquellos procesos que no están completamente automatizados, dependiendo así del operador para llevar a cabo ciertas etapas, por lo que un gran número de variaciones a lo largo de la trayectoria pueden ocurrir. En estos casos es de suma importancia sincronizar dichas trayectorias antes de realizar un análisis posterior.

La sincronización de reactores es de suma importancia ya que esto permite mejorar la calidad del producto, así como reducir tiempos de ciclo. En la actualidad las industrias requieren de procesos que les permitan obtener el producto final de la manera más eficaz y eficiente posible; debido a esto, el monitoreo y la sincronización han tomado interés para lograr dicho cometido. Algunas de las técnicas más conocidas y empleadas son Alineación Temporal (DTW), PLS y PCA, que es ampliamente usado en comprensión de datos, modelado, detección de valores singulares, entre otros. El objetivo de PCA es

adquirir los puntajes irrelevantes que expresen más variaciones en una matriz (Gao *et al.*, 2016).

#### **2.4 Ajuste dinámico del tiempo (dynamic time warping)**

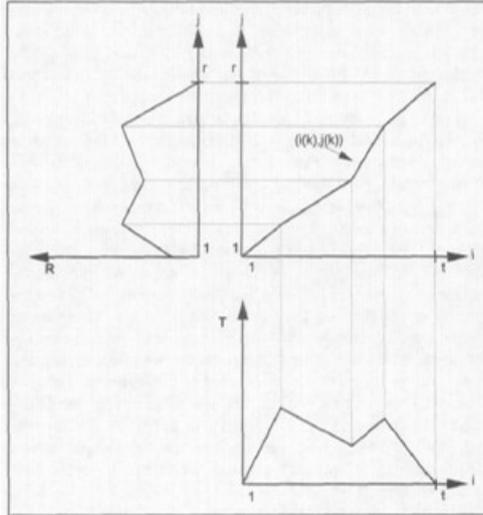
El enfoque de DTW, que fue desarrollado para el reconocimiento del habla para hacer coincidir eventos similares entre señales, tiene una aplicación más amplia en la sincronización de trayectorias batch (Wan *et al.*, 2014). DTW usa el principio de programación dinámica para minimizar mediciones desiguales o una distancia entre dos trayectorias y puede cambiar algunas características del vector en el tiempo, comprimiendo algunos o expandiendo otros para alcanzar la mínima distancia.

John & Paul (1998) presentan un método iterativo basado en DTW para sincronizar trayectorias batch. Este método no se basa en ninguna variable para realizar la sincronización.

$T$  y  $R$  representan trayectorias multivariadas de dos lotes, ambos son matrices de dimensión  $t \times N$  y  $r \times N$ , respectivamente, donde  $t$  y  $r$  son el número de observaciones y  $N$  es el número de variables medidas. DTW usa el principio de programación dinámica para minimizar las desigualdades medidas entre dos trayectorias. El método modifica las trayectorias de manera que eventos similares son alineados y se obtiene una distancia mínima entre ellos. Se cambian algunos vectores en el tiempo y se comprimen o expanden otros para alcanzar dicha distancia mínima.

Por otro lado,  $i$  y  $j$  denotan el índice de tiempo de las trayectorias  $T$  y  $R$  respectivamente. DTW encontrará una secuencia  $F^*$  o  $K$  puntos en una rejilla  $t \times r$ . Cada punto  $c^{(k)}$  es un par ordenado indicando una posición en la rejilla.

La Figura 2.3 muestra la idea principal de DTW para las trayectorias  $T$  y  $R$ . Si se procede vector por vector, DTW encuentra el mejor vector en  $R$  contra cual comparar en el vector  $T$  y viceversa.



**Figura 2.3** Alineamiento de dos trayectorias desiguales usando DTW

La ruta que se obtiene no es más que una serie de puntos, de tal manera que se encuentra la distancia mínima ( $F$ ) entre ambas señales.

$$F = \{c(1), c(2), \dots, c(k), \dots, c(K)\} \quad 3.1$$

$$c(k) = [i(k), j(k)] \quad 3.2$$

De donde cada punto  $c(k)$  es un punto indicando un lugar en la rejilla,  $i$  y  $j$  son puntos correspondientes a sus respectivas señales.

De acuerdo a Sakoe y Chiba, (1978) y Myers *et al.*, (1980), una forma general de esta distancia medida para cualquier ruta es:

$$D(t, r) = \frac{\sum_{k=1}^K d[i(k), j(k) \cdot w(k)]}{N(w)} \quad 3.3$$

Donde  $D(t, r)$  es una distancia total normalizada entre las dos trayectorias;

$d[i(k)]$  es la distancia local ponderada entre el vector  $i(k)$  de la trayectoria  $T$  y el vector  $j(k)$  de la trayectoria  $R$ . La distancia local más usada es la distancia cuadrática ponderada, la cual se representa de la siguiente manera:

$$d(i(k)) = \left\| T[i(k),:] - R[j(k),:] \right\| \cdot W \cdot \left\| T[i(k),:] - R[j(k),:] \right\|^T \quad 3.4$$

Donde  $W$  es una matriz positiva definida ponderada que refleja la importancia relativa de cada variable medida;  $w(k)$  es una función ponderada no negativa para las distancias locales  $d[i(k),j(k)]$ ; y  $N(k)$  es un factor de normalización el cual es una función de la función ponderada  $w(k)$ .

Por lo tanto,  $D(t,r)$  es la suma de todas las distancias locales entre pares de observaciones en las dos trayectorias que están sobre la ruta, ponderada por  $w(k)$ , y dividido por el factor de normalización  $N(w)$ . Así, la ruta óptima se encuentra como la solución para el siguiente problema de optimización:

$$D^*(t,r) = \min_F [D(t,r)] \quad 3.5$$

$$F^* = \arg \min_F [D(t,r)] \quad 3.6$$

Donde  $D^*(t,r)$  es la mínima distancia total normalizada entre  $T, R, F^*$  es la ruta óptima. El valor del parámetro  $N(w)$  dependerá del tipo de función ponderada  $w(k)$  que se use. Su propósito es hacer a la distancia total normalizada independiente del número de puntos  $K$  en la ruta y de las longitudes de dos trayectorias.

La función ponderada  $w(k)$  depende de las restricciones locales y tiene dos propósitos: el primero es proveer de flexibilidad al algoritmo y el segundo es hacer a la distancia total normalizada independiente del número de puntos en la ruta imponiendo un valor apropiado para el factor de normalización  $N(w)$ .

La sincronización por medio de DTW puede llevarse a cabo de dos maneras: simétrica y asimétrica. En el primer caso las dos señales que se tengan son consideradas igualmente importantes, y los índices  $i$  y  $j$  son mapeados en un índice de tiempo común. La ruta óptima pasa a través de todos los puntos de ambas señales y sus roles pueden ser revertidos, es decir, si la posición de las señales cambia, se obtiene la misma ruta óptima, así como la misma distancia mínima.

En la sincronización asimétrica las señales no se consideran igualmente importantes, una de ellas es tomada como referencia. A diferencia de la sincronización simétrica, en este caso no se obtienen la misma ruta óptima ni distancia mínima si los roles de las señales se intercambian. Por otro lado, la ruta óptima pasa a través de cada punto de la señal referencia, pero puede omitir algunos en la otra señal. En este caso se trabajará con una sincronización asimétrica ya que si se tiene una referencia.

## **Capítulo III. Metodología**

### **3.1 Proceso de producción de resinas**

Lo anterior será aplicado a un sistema de producción de resinas ureicas que se tiene en la empresa ARAUCO, específicamente las de tipo 8125. Se trabajará con esta resina de tipo ureica debido a que es la que más se fabrica para su posterior uso en tableros de aglomerado dentro de la misma planta. Antes de iniciar el proceso en el reactor, es importante verificar que la materia prima esté preparada, que el reactor esté vacío y la válvula de fondo debidamente cerrada. El proceso inicia con la carga de formol al 52% al reactor, el cual cuenta con un sistema de agitación que es inicializado una vez que se haya alimentado la mitad de la carga, a partir de este momento se empieza a calentar a 60°C. Es necesario agregar una cantidad específica de trietanolamina (TEA) o sosa con el fin de ajustar el pH en este punto del proceso. Cabe mencionar que una vez que se alimentó el formol, se carga agua de ajuste en caso de ser necesario.

Se ajusta el pH con sosa al 50%, dicho parámetro debe estar en un rango de 4.5 a 4.7. Una vez que la temperatura del reactor es de 60°C, se procede a alimentar la primera carga de urea y nuevamente es necesario ajustar el pH, el cual debe estar entre 5 y 5.2. Se procede con el calentamiento hasta 90°C, se realizan mediciones de pH a los 70, 80 y 90°C. Se mantiene la temperatura a 90°C y nuevamente se hacen mediciones de pH e índice de refracción. En este punto se observa la apariencia de la resina:

- a) Si la muestra es turbia, mantener a 90°C por 40 minutos.
- b) Si la muestra es clara, mantener a 90°C por 20 minutos.

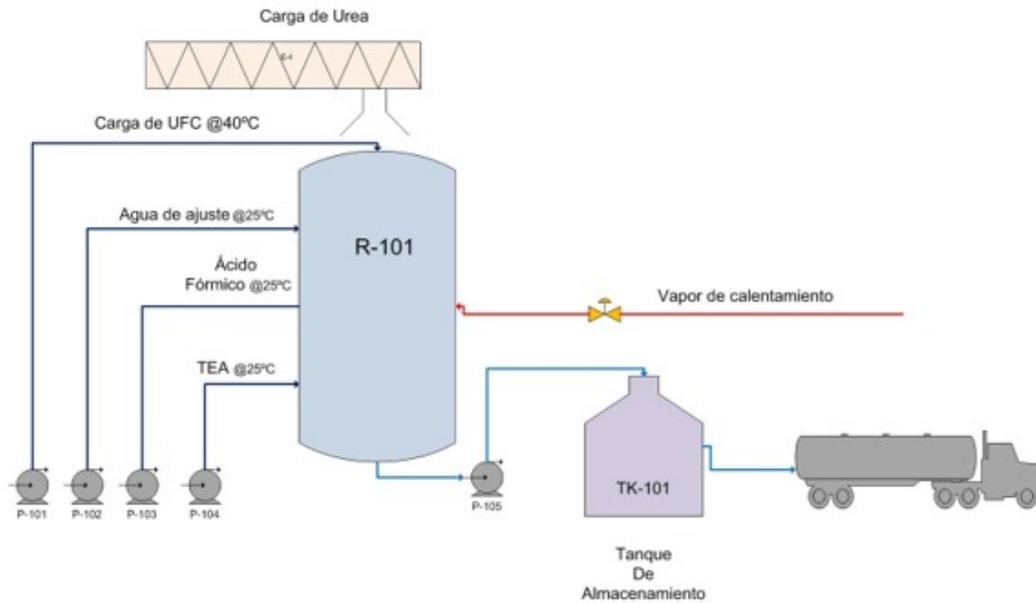
La reacción entre la urea y el formaldehído es exotérmica, por lo que es importante bajar la temperatura del reactor antes de alimentar urea. La segunda carga de urea es a 70°C y nuevamente se alimenta vapor para alcanzar una temperatura de 92 a 93°C, a esta temperatura se verifica que el pH sea de 5 a 5.2. A partir de este momento se mide la viscosidad, en este caso, se emplea la viscosidad Gardner por motivos de practicidad; dichas

mediciones se realizan cada 15 minutos hasta alcanzar un valor de G. Cuando se alcance este valor de viscosidad, se mide el pH, ahora deberá tener valor de 6 a 6.2, posteriormente se aplica enfriamiento a 75°C. En este punto el índice de refracción deseado es 1.4480. A lo largo del lote se debe ajustar el pH con sosa las veces que sea necesario.

#### Viscosidad Gardner

Se emplea un viscosímetro Gardner o de burbuja para determinar rápidamente la viscosidad cinemática de la resina. El líquido referencia está sellado en tubos de vidrio. Es importante realizar las mediciones a una temperatura constante. El tiempo para que la burbuja suba es proporcional a la viscosidad, es decir, cuanto más rápido sube, menor es la viscosidad. Los tubos referencia están etiquetados alfabéticamente de la A a la Z. La muestra de resina que se quiere analizar se coloca en una rejilla entre dos tubos referencia con viscosidad conocida. La viscosidad de la muestra será determinada por la burbuja de la referencia que más se acerque al momento de subir. El proceso se hace por duplicado.

La tercera carga de urea es a 75°C máximo, la temperatura se eleva nuevamente hasta 85°C y se procede con la condensación. La viscosidad se mide cada 10 minutos hasta alcanzar un valor de Q, en el anexo 1 se muestran los valores correspondientes en centipoise (cp). Una vez que se alcanzó la viscosidad deseada se agrega TEA para cortar la reacción y se enfría a 65°C. Finalmente, se alimenta la última carga de urea y se deja en agitación por 15 minutos. Se aplica enfriamiento a 40°C y se adiciona bicarbonato. Posteriormente se aplica enfriamiento total (20°C), el pH debe tener un valor de 7.8 a 8. Por último, se toma una muestra de resina de un litro, se registran los resultados finales y la muestra pasa a laboratorio para pruebas finales de calidad. Una vez terminada la resina, se transporta a un tanque de almacenamiento y posteriormente se carga a pipas para su posterior transporte al cliente final. En la Figura 3.1 se ejemplifica de manera general el proceso productivo de resinas.



**Figura 3.1** Proceso productivo de resinas

### 3. 2 Monitoreo

Los lotes se monitorean directamente en la planta y las variables a monitorear son las que determinan la velocidad de reacción, así como el tipo de polímero que se va a formar, es decir, la resina UF con sus debidas especificaciones. Dichas variables son:

1. temperatura
2. pH
3. viscosidad

La variable independiente es el tiempo. De las variables monitoreadas únicamente la temperatura se monitorea en tiempo real, para obtener datos de pH y viscosidad es necesario tomar muestras de resinas cada 20 minutos aproximadamente y tomar las lecturas en el potenciómetro y en el equipo de viscosidad Gardner respectivamente. Las lecturas tomadas deben ser registradas para el posterior análisis.

### 3.3 Análisis preliminar de datos

Una vez que se llevó a cabo el monitoreo, fue posible obtener perfiles de las variables de interés para observar su comportamiento. Las variables se analizaron por separado por lo que es necesario separar las muestras de temperatura, pH y viscosidad de cada uno de los lotes. De esta manera se genera una matriz de datos para cada variable.

Los perfiles se graficaron por separado, cada lote con su respectivo número de muestras. De los perfiles graficados se pudo observar la gran variación que existe entre los lotes de resinas en cuanto a su duración, así como en la cantidad de lecturas que hay en cada uno de ellos. Antes de continuar con cualquier otro análisis, las trayectorias de los lotes monitoreados deberán ser iguales, a continuación, se explica cómo se realizó.

#### Trayectorias de igual longitud

Antes de hacer una sincronización, se deben tener trayectorias de igual longitud en cada una de las variables. Primero se realizaron las matrices de cada una de las variables y posteriormente se realizó una interpolación lineal.

La idea de interpolación es poder estimar  $f(x)$  para un  $x$  arbitrario, a partir de la construcción de una curva o superficie que une los puntos donde se han realizado las mediciones y cuyo valor si se conoce. Se eligió este método ya que es el más simple en uso actualmente. La idea básica es conectar los dos puntos dados en  $x_i$ , es decir:  $(x_0, y_0)$  y  $(x_1, y_1)$ .

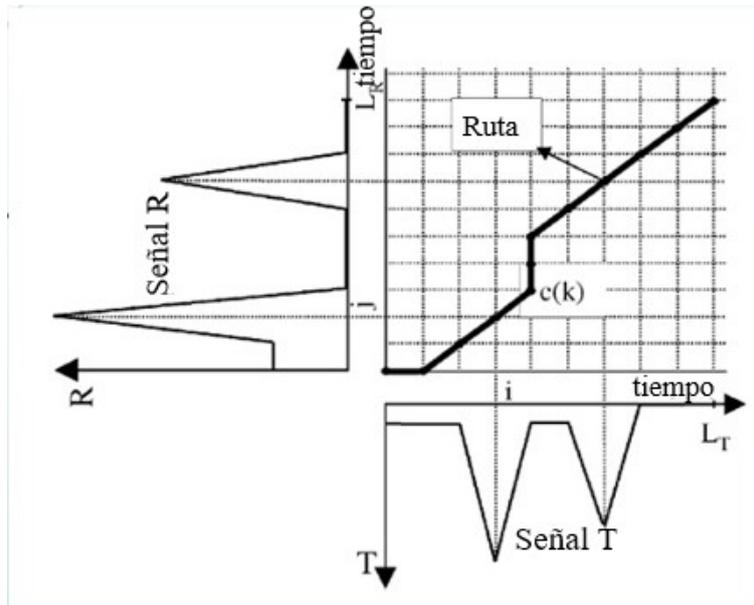
Debido a que en cada variable tiene diferente número de muestras se tomó como referencia el lote con mayor número de lecturas. De esta manera no se descartan lecturas y las faltantes se obtienen con la interpolación.

### 3.4 Sincronización

El objetivo de DTW es encontrar la mejor ruta a través de distancias de vector a vector, de tal manera que la distancia total medida entre las dos trayectorias se minimiza. En el eje  $x$  se ubica una señal, generalmente una referencia, y en el

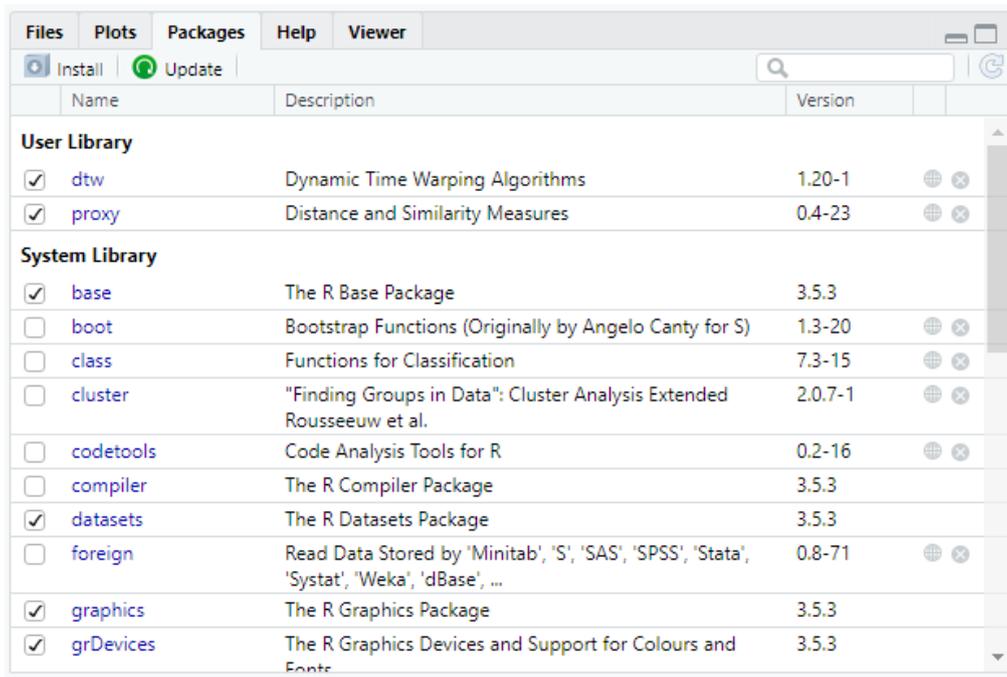
eje  $y$  una muestra. En la Figura 3.2 se ejemplifica como se encuentra una ruta óptima a partir de ambas señales.

Las rutas de las variables se sincronizan con su respectiva de referencia para así poder encontrar la ruta con la distancia más corta entre ambas.



**Figura 3.2** Ejemplo de DTW

La sincronización se llevó a cabo en el software R Studio, que es un lenguaje de programación libre. Permite hacer análisis y desarrollo para poder analizar los datos con R. Dicho programa cuenta con distintos paquetes pre cargados, entre ellos DTW. En la Figura 3.3 se muestran los paquetes que se emplean para hacer la sincronización. Previamente se genera la base de datos que se va a analizar, es decir los datos de los lotes monitoreados, así como la referencia que se va a emplear para hacer la sincronización.



**Figura 3.3** Paquetes de R Studio

La metodología requiere una muestra y una referencia, cada una en un eje  $x$  y  $y$ . Cada muestra o vector se sincroniza con la referencia y posteriormente se grafica la distancia mínima obtenida. Los comandos empleados son los siguientes:

```
alignment<-dtw(vec10,yy,keep=TRUE)
```

```
plot(alignment,type="threeway",main="pH alignment")
```

En la Figura 3.4 se muestra el espacio de trabajo de R Studio, empleando 10 muestras de pH con su respectiva referencia. Lo mismo se realiza para las otras variables.

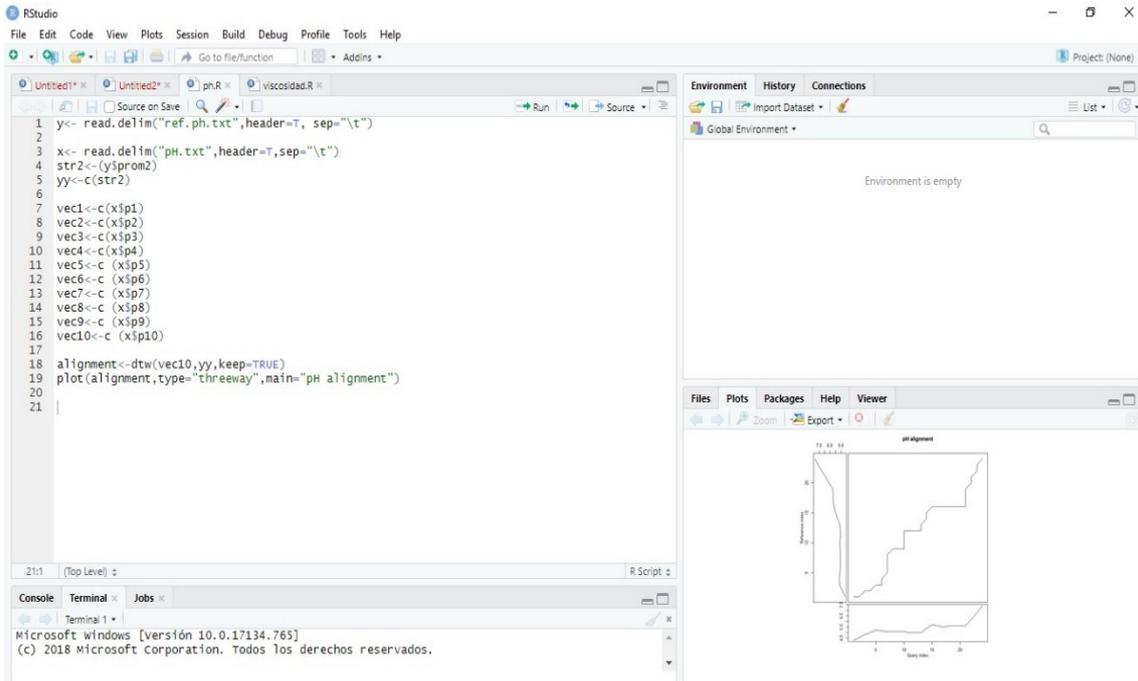


Figura 3.4 R Studio

## **Capítulo IV. Resultados y discusión**

#### 4.1 Resultados en el monitoreo

Durante la etapa de monitoreo se pudo observar que la duración de cada lote de resina se veía afectado por factores ajenos al proceso o a la reacción que se lleva a cabo durante el mismo. Dichos factores son: fallas en equipos, el operador en turno, o algunos inconvenientes en cuanto a logística, lo que ocasiona tiempos muertos, por lo tanto, se afectan los tiempos de ciclo. Cabe mencionar que se consideran la materia prima y el operador en turno ya que también son factores que influyen en la duración del lote. Los lotes monitoreados se muestran a continuación en las Tablas 4.1 y 4.2.

*Tabla 4.1 Primer conjunto de lotes monitoreados*

Lote	Tiempo (min)	Materia prima	Operador	Horas
3534	520	concentrado	Luis	8.67
3528	395	formol	Luis	6.58
3629	450	concentrado	Paco	7.5
3630	420	concentrado	Carlos	7
3637	460	concentrado	Paco	7.67
3708	405	formol	Paco	6.75
3666	305	concentrado	Luis	5.08
3667	355	concentrado	Luis	5.92
3709	300	formol	Luis	5
3760	420	Concentrado	Carlos	7
3776	480	concentrado	Jorge	8
3777	390	Concentrado	Carlos	6.5
3793	330	Formol	Luis	5.5
3792	450	formol	Jorge	7.5
3809	400	Formol	Paco	6.67
3808	340	formol	Luis	5.67
3794	290	formol	Luis	4.83
			promedio	6.58

*Tabla 4.2 Segundo conjunto de lotes monitoreados*

Lote	Tiempo (min)	Materia prima	Operador	Horas
3835	315	formol	Luis	5.25
3836	400	formol	Jorge	6.67
3950	420	formol	Jorge	7
3957	285	formol	Luis	4.75
3960	400	formol	Paco	6.67
3959	370	formol	Luis	6.17
3991	480	Concentrado	Jorge	8
3990	430	concentrado	Jorge	7.17

3964	470	concentrado	Jorge	7.83
3965	420	concentrado	Jorge	7
4054	340	concentrado	Luis	5.67
4055	445	concentrado	Luis	7.42
4056	425	concentrado	Luis	7.08
4057	345	formol	Luis	5.75
4107	495	concentrado	Jorge	8.25
4151	400	formol	Armando	6.67
4174	460	formol	Jorge	7.67
4179	330	formol	Luis	5.5
4182	310	formol	Luis	5.17
			Promedio	6.7

De cada lote se obtienen lecturas de las variables monitoreadas, en este caso, temperatura, pH, peso y viscosidad, así como el número de lote, el operador en turno y la materia prima. Las únicas variables que se monitorean en tiempo real son la temperatura y el peso. Como se puede observar a lo largo del análisis, el peso no es una variable que se considere debido a que su comportamiento es el mismo y no se relaciona directamente con las demás variables. Un ejemplo de un lote de resina monitoreada se muestra en la Tabla 4.3.

*Tabla 4.3 Datos de un lote monitoreado*

<b>LOTE:</b>	3836	<b>formol</b>		
<b>Operador :</b>	Jorge	02/07/2018		
<b>tiempo</b>	<b>T (°C)</b>	<b>peso</b>	<b>pH</b>	<b>μ<sub>CP</sub></b>
0	55	0		
30	60	17980		
35	60	17995	4.6	
40	60	17994		
45	52	23331	5.5	
55	70	23297	5.3	
65	80	23269	5.1	
75	90	23263	5	
115	90	23349		
135	70	23368		
165	63	26078		
185	92	26007		
200	93	26072	5.1	60
235	93	26139		
250	75	26178		
255	69	28138		
275	84	28042	5.6	150

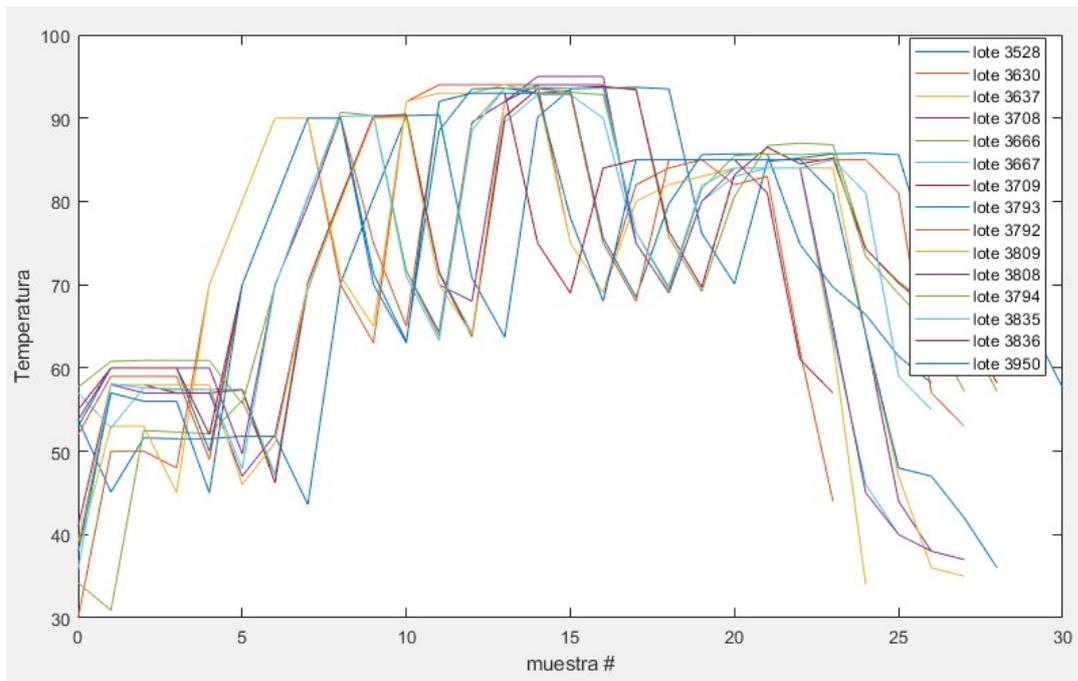
295	85	28086	5.6	220
310	85	28057	5.6	300
320	85	28061	5.6	340
335	85	28087		
340	81	28218	7.3	440

## 4.2 Resultados en el análisis preliminar de datos

En la Figura 4.1 se muestra el perfil de temperatura, donde se puede apreciar la variación que hay entre lotes a lo largo del proceso. Se observa mayor variación al inicio, en la etapa de carga, esto se debe a que en ocasiones la materia prima es formol y en otras en concentrado. También se observa que los lotes tienen distinto número de muestras, esto refleja la variación que hay en los tiempos de ciclo.

La reacción que se lleva a cabo es exotérmica, es por esto que la temperatura del reactor debe disminuirse antes de cada carga de urea, en este caso son tres a lo largo del lote. Dichas cargas se pueden observar también en la Figura 4.1 en las caídas de temperatura. Por otro lado, la temperatura inicial de cada lote no es siempre la misma debido a que en ocasiones se termina un lote e inmediatamente se descarga para comenzar el siguiente, por lo que la temperatura es más alta. Sin embargo, en otras ocasiones no se descarga en ese momento o pasa algún tiempo antes de iniciar otro lote, es por eso que la temperatura inicial es más baja.

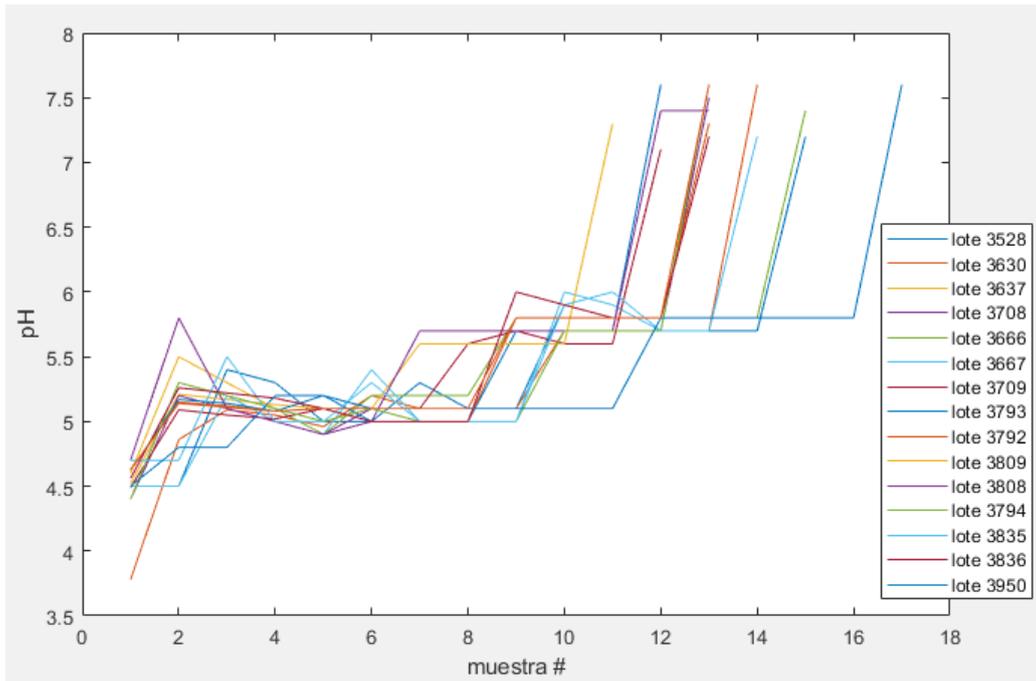
Cabe mencionar que en las siguientes figuras solo se grafican 15 lotes con el fin de tener una mejor apreciación del comportamiento de las variables a través del lote.



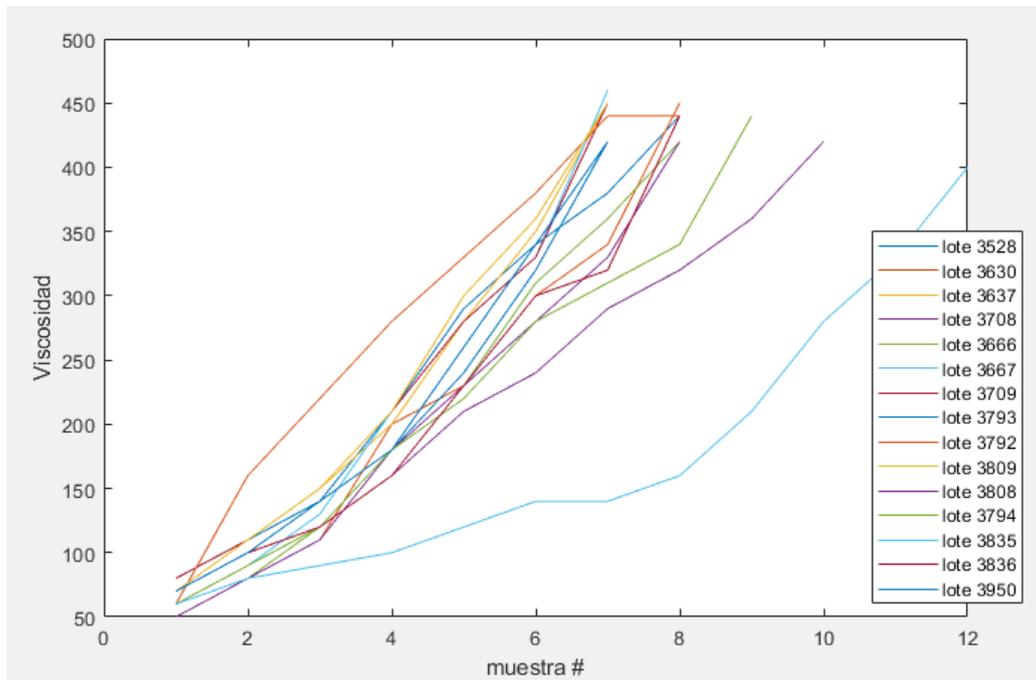
**Figura 4.1** Perfiles de temperatura con distintas longitudes

En la Figura 4.2 se muestra el perfil de pH, esta variable inicia su medición al terminar de cargar la materia prima y se deja de tomar lectura hasta que la resina alcanza la viscosidad específica. El pH se maneja en valores de 5 a 5.2 la mayor parte del tiempo ya que en este valor la reacción se lleva a cabo de mejor manera. Las variaciones que se presentan son cuando las lecturas se salen de los parámetros establecidos y es necesario ajustar el pH con sosa. Cabe mencionar que la sosa se agrega la cantidad de veces que sea necesario a lo largo de todo el lote. Después de la segunda condensación el pH va aumentando y es necesario tener un control de sus valores para que no se exceda del valor específico de pH al final de la resina.

En la Figura 4.3 se muestra el perfil de la viscosidad, dicha variable no es medida al inicio, sino hasta la primera condensación de la resina, que sucede aproximadamente a mitad del lote. En el gráfico se observa que el comportamiento de esta variable es regular ya que no se utilizan sustancias adicionales para regularla ya que no es necesario. La viscosidad va incrementando a lo largo del lote. Una vez que se alcanzó la viscosidad específica de la resina se dejan de tomar lecturas. Como se puede apreciar en las figuras, las variables muestran distintas longitudes, lo cual representa variaciones entre lote y lote.



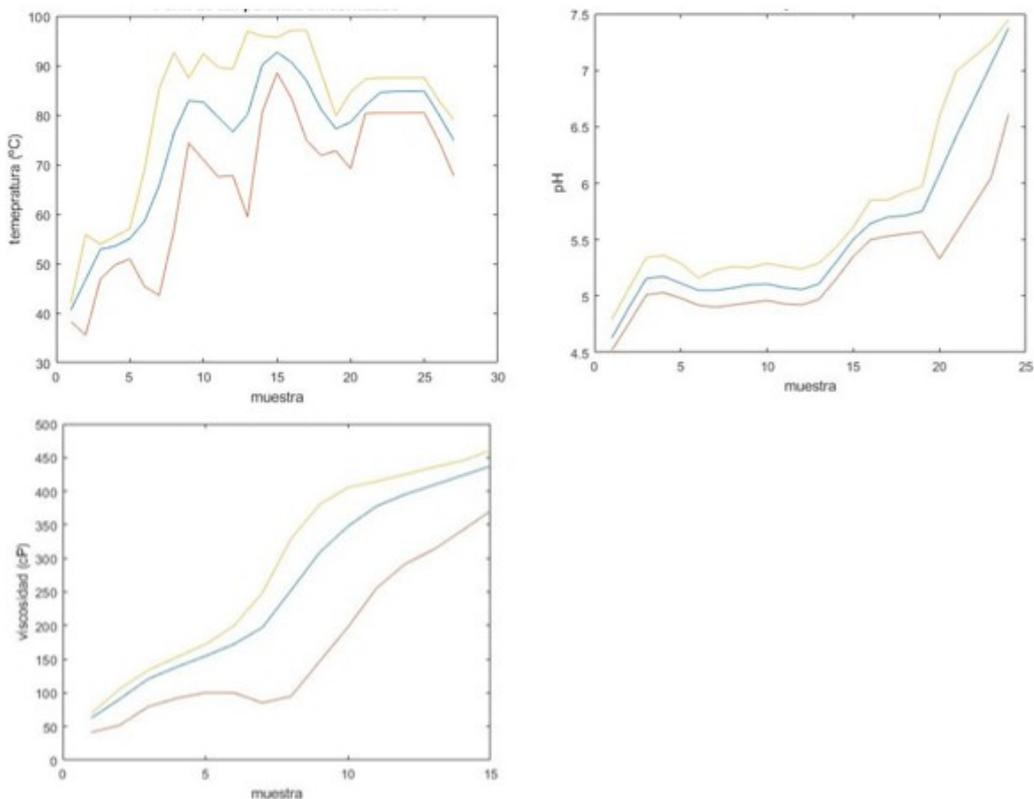
**Figura 4.2** Perfiles de pH con distintas longitudes



**Figura 4.3** Perfiles de viscosidad con distintas longitudes

En la Figura 4.4 se muestran los límites mínimos y máximos de cada variable. Para esto fue necesario que cada variable tuviera el mismo número de

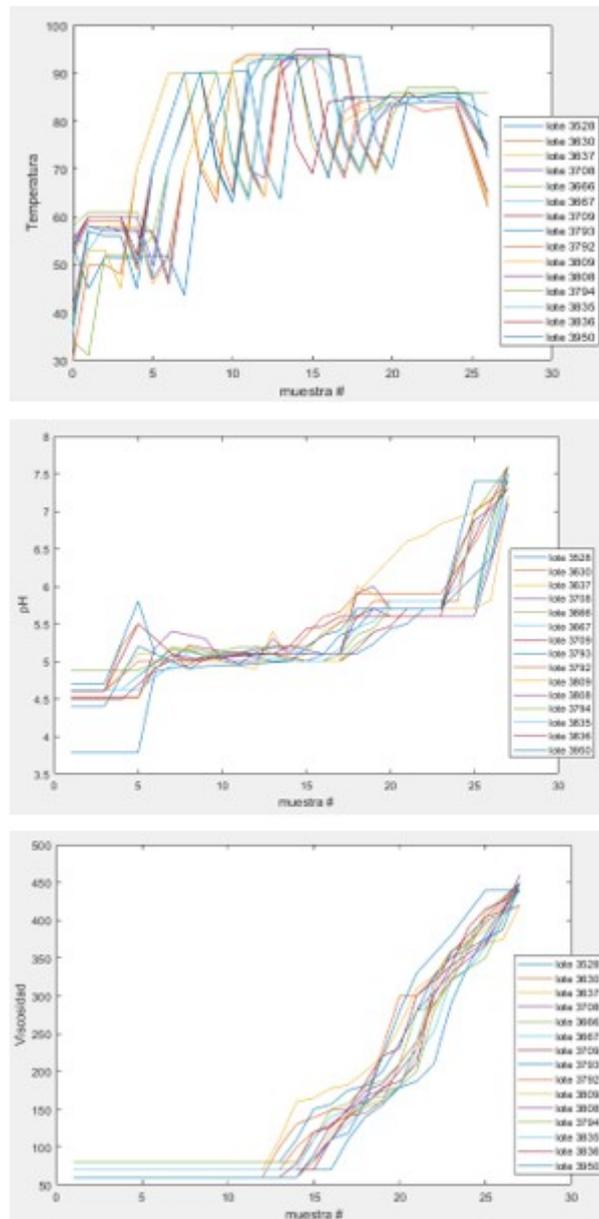
muestras en cada lote, como se observa, se tienen 27 muestras de temperatura, 24 de pH y 15 de viscosidad. Esto sirve como una primera aproximación de la ruta óptima que debieran tener los lotes de resinas. Se aprecia que la variable con menor margen en sus límites es el pH, esto se debe a que es la variable que regula la velocidad de reacción. Al final de lote el margen es mayor ya que el pH se incrementa. Por otro lado, la temperatura tiene un margen ligeramente mayor, sin embargo, es importante mencionar que nunca se debe alcanzar 100°C. Se debe tener especial cuidado en esta parte ya que la reacción es exotérmica, motivo por el cual los límites inferiores en las caídas de temperatura son mayores. Finalmente, en la viscosidad se tiene un margen mínimo al inicio ya que las primeras muestras en cada lote son muy similares y nunca van a exceder un valor B en viscosidad Gardner. Es importante mencionar que la viscosidad es la única variable en la que no es necesario un límite inferior ya que se debe alcanzar un valor específico al final.



**Figura 4.4** Límites de temperatura, pH y viscosidad

A continuación, se muestran los perfiles de las variables una vez que se aplicó interpolación lineal para obtener longitudes iguales, es decir, todas las variables

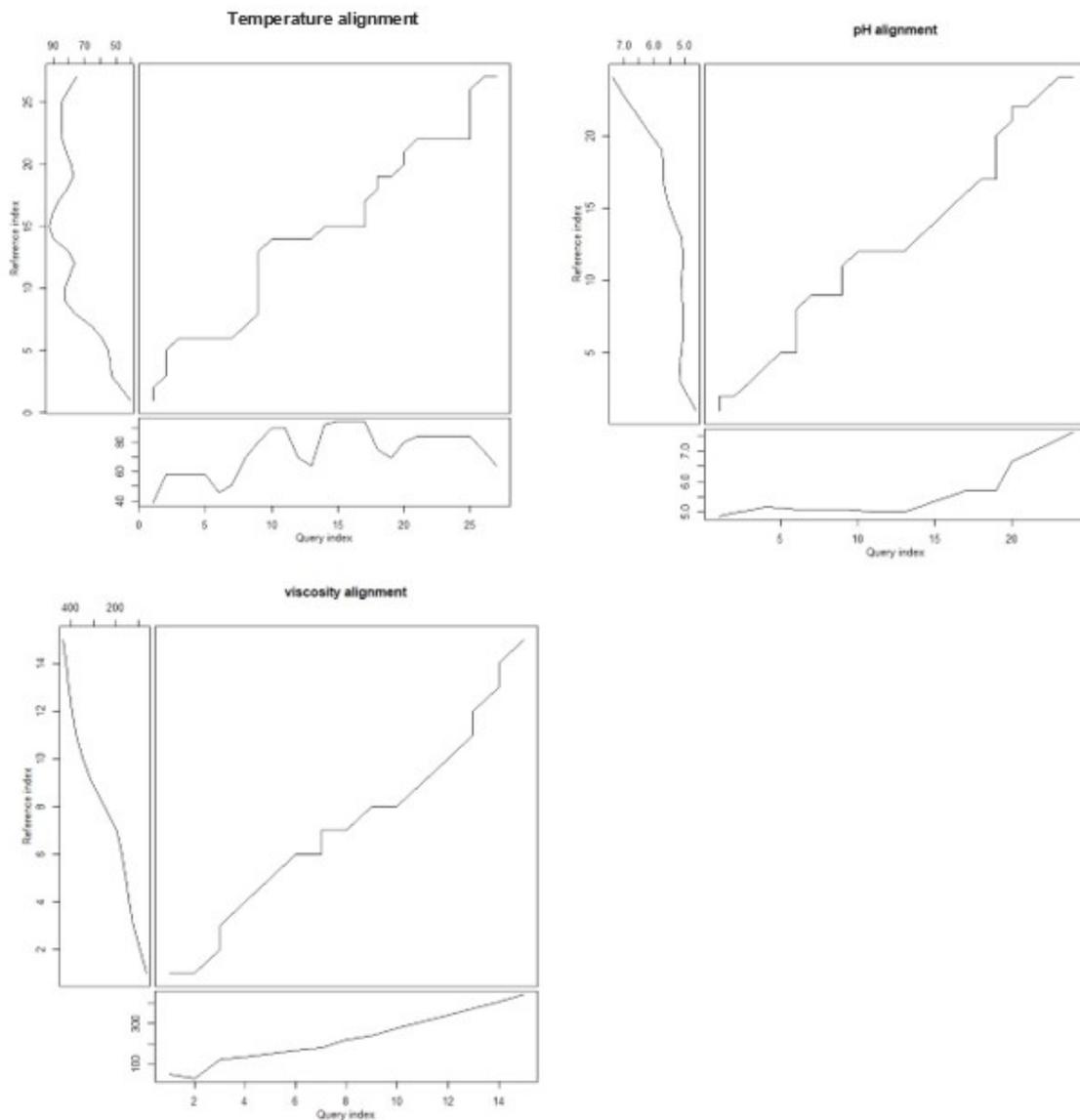
con el mismo número de muestras. Los perfiles obtenidos se muestran en la Figura 4.5. Para lograr lo anterior se utilizó el software Matlab, usando la herramienta *samplealign*, como puede observarse, ahora todas las variables tienen un total de 27 muestras. Como se muestra en la Tabla 4.3, en las lecturas de pH y viscosidad hay huecos, es decir, no se cuenta con todas las lecturas de estas variables. Los valores faltantes se obtuvieron con la interpolación realizada, es por esto que se tienen 27 lecturas en todas las variables.



**Figura 4.5** Perfiles de las variables con longitudes iguales

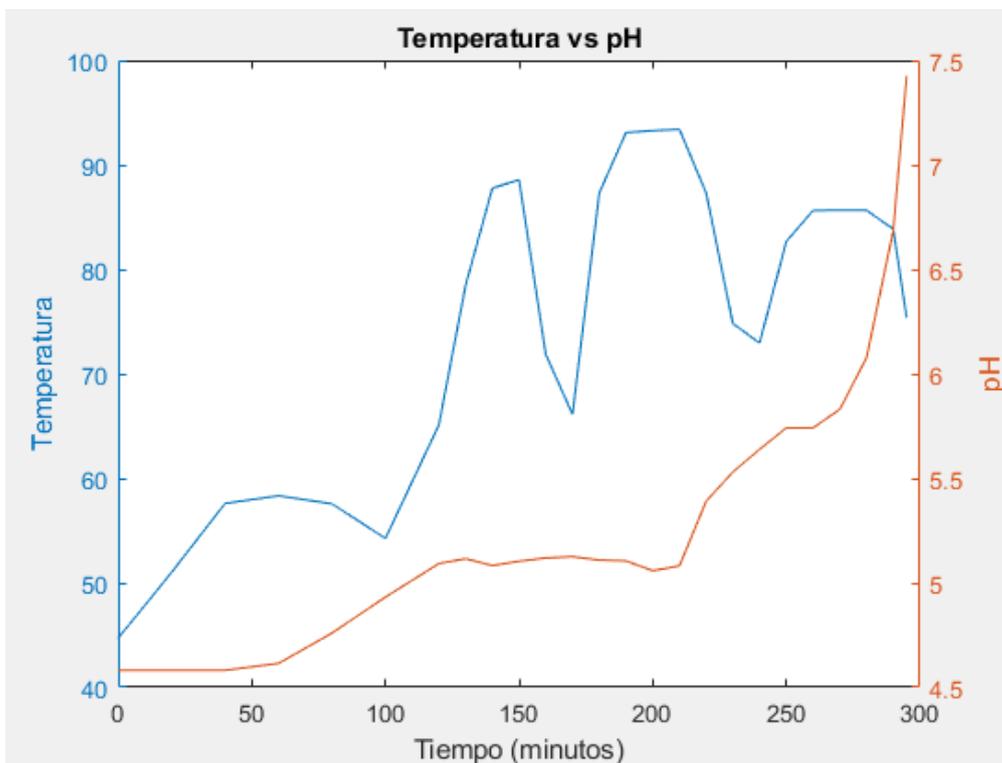
### 4.3 Resultados de sincronización

La sincronización usando la técnica DTW se llevó a cabo en el software de uso libre R Studio. En las Figura 4.6 se muestran las rutas obtenidas de temperatura, pH y viscosidad respectivamente. La ruta obtenida refleja un comportamiento distinto a la referencia y el lote muestra, esto se debe a que la metodología encuentra la ruta más cercana entre las otras dos. Como puede observarse, las rutas del pH y viscosidad tienen un comportamiento más constante, lo cual indica que la temperatura es la variable más significativa.



**Figura 4.6** Variables sincronizadas usando DTW

Se puede dar seguimiento a los lotes de resinas por medio de gráficos, en la Figura 4.7 se muestra una trayectoria de resinas basada en temperatura y pH, obtenida de la sincronización previamente realizada. El gráfico se obtuvo a partir de los lotes del mejor operador, es decir, aquel con los mejores tiempos de ciclo. Es importante mencionar que los tiempos de ciclo considerados en el análisis abarcan desde la carga de materiales hasta que la resina se termina y se agrega TEA para desactivar la reacción. Los tiempos de descarga no se consideran para disminuir la variación.



**Figura 4.7** Temperatura vs pH

Considerando los lotes fabricados por el operador con mejores tiempos de ciclo se obtuvo la ruta que se muestra en la Figura anterior. Se tiene una duración de 300 minutos aproximadamente, si lo comparamos con los promedios de tiempos de ciclos presentados en las Tablas 4.1 y 4.2 se observa una disminución en la duración del lote.

## **Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones**

## Conclusiones

La captura de datos por el sistema de monitoreo de la planta es una mina valiosa de información, que puede permitir analizar situaciones fuera de control y encontrar la explicación a este comportamiento.

A través del análisis estadístico que se llevó a cabo fue posible determinar el comportamiento que deben tener las variables monitoreadas, así como los límites mínimos y máximos. Con esto es posible establecer una ruta común en la fabricación de resinas, lo cual disminuye variaciones entre lotes y se evita la generación de productos fuera de especificación.

De acuerdo a los gráficos obtenidos, especialmente es los de sincronización DTW, se puede concluir que la variable más significativa es la temperatura. Esto se debe a que es la que más variación tiene en el comportamiento de cada uno de los lotes, por otro lado, al ser una reacción exotérmica se debe tener especial cuidado en esta variable.

La técnica DTW resulta ser la más adecuada para este caso ya que no se cuenta con un sistema totalmente automatizado. Se obtuvo un gráfico que servirá como referencia a los operadores que fabrican la resina monitoreada. Por medio del cual será posible determinar valores que deben tener las variables en un determinado tiempo.

Como se mencionó en el capítulo 3, a lo largo del lote, se agrega sosa o ácido fórmico para ajustar el pH, al llevar a cabo una sincronización se reduce la cantidad de dichas sustancias, lo cual es favorable para el medio ambiente. Por otro lado, al tener lotes sincronizados, se tienen tiempos de ciclo constantes, con lo cual se tiene un mejor aprovechamiento de energía.

## Recomendaciones

El monitoreo es una etapa fundamental por lo que es recomendable monitorear una resina en específico para disminuir variaciones. Otra manera de reducir dichas variaciones es monitorear únicamente las resinas fabricadas por un operador, preferentemente el que tenga los mejores tiempos. Por otro lado, si se fabrica la resina con distintas materias primas (formol y colas) considerar solo un tipo, ya que esto hace ocasiona más variables, específicamente en la etapa de carga.

Con el fin de obtener menos datos a partir de interpolación lineal, se recomienda Tomar una lectura inicial de pH y viscosidad, aunque no se requiera en el procedimiento. Esto permitirá tener un valor real de las condiciones iniciales del lote, lo cual será de ayuda a la hora de establecer límites mínimos y máximos de cada una de las variables. Por otro lado, es recomendable tomar lecturas de todas las variables, aunque el operador no las realice, se desea tener la mayor cantidad de lecturas posible. Finalmente, realizar pruebas preliminares en el tratamiento estadístico utilizando de 10 a 15 lotes. Esto se recomienda con el fin de tener una primera aproximación del comportamiento de las variables y si es necesario hacer ajustes en el monitoreo.

## Bibliografía

- Khorami, Fgaier, Elkamel, Biglari y Chen(2014) "Multivariate model of a chemical toner manufacturing process". *ChemicalEngineeringTechnology, Vol 40* (3) 459- 469.
- Rodríguez (2013). Automatización de un proceso químico batch para la producción de polioles" (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- Bolívar (2012). Desarrollo , caracterización y optimización de resinas base urea-formol ( uf ), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de formaldehído(Tesis doctoral). Universidad de Burgos, Burgos, España.
- Dunky, M. (1998). "Urea — formaldehyde ( UF ) adhesive resins for wood", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 18(June 1997), 95–107.
- Ela, A., & Ketan, P. D. (2013). Online Monitoring for Uneven Length Batch Processes using Function Space Principal Component Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*(Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20131216-3-IN-2044.00058>
- Gao, Y., Wang, X., Wang, Z., & Zhao, L. (2016). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Fault detection in time-varying chemical process through incremental principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 158, 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.07.005>
- Kassidas, MacGregor, Taylor (1998). Synchronization of batch trajectories using dynamic time warping. *American Institute of Chemicals Engineers*, 44 (4), 864- 875.
- Nomikos y MacGregor (1995). Multivariate SPC charts of monitoring batch processes. *Technometrics* 37 (1), 41-59.
- Pravdova, V., Walczak, B., & Massart, D. L. (2002). A comparison of two algorithms for warping of analytical signals, *456*(December 2001), 77–92.
- Wan, J., Marjanovic, O., & Lennox, B. (2014). Uneven batch data alignment with application to the control of batch end-product quality. *ISA Transactions*, 53(2), 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.12.020>
- Wang, H., & Yao, M. (2015). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Fault detection of batch processes based on multivariate functional kernel principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.09.018>

Vallejos (2010). Estudio de la reducción de emisión de formaldehído en las resinas de urea formaldehído. Estudio de la reducción de emisión de formaldehído en las resinas de urea formaldehído. Tesis de pregrado. Universidad de Burgos, Burgos, España.

Morones (2008). Sincronización de reactores batch para la reacción urea-formaldehído en la producción de adhesivos para madera.(Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Durango.Durango, México.

## ANEXO

Conversión de viscosidad	
Centipoise	Viscosidad Gardner
10	A4
15	A3
25	A2
30	A1
40	A
60	B
80	C
100	D
120	E
140	F
160	G
200	H
220	I
240	J
280	K
300	L
320	M
340	N
360	O
400	P
440	Q
460	R
500	S
550	T
600	U
900	V
1000	W
1300	X
1700	Y
2300	Z

Fuente: Dianal América, Inc.