



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

TEMA: “INFLUENCIA DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA VISCOSIDAD DE
SOLUCIONES POLIMÉRICAS”

AUTOR: JIMÉNEZ JARAMILLO, CRISTOPHER ANDRÉS

DIRECTOR: ING. NARVAEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO, MPhil.

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO DEL DIRECTOR

Certifico que el trabajo de titulación, *“INFLUENCIA DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA VISCOSIDAD DE SOLUCIONES POLIMÉRICAS”* fue realizado por el señor *Jiménez Jaramillo, Christopher Andrés* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de abril del 2019

Firma:

ING. NARVAEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO, MPhil.

c. c. 1720037165



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Jiménez Jaramillo, Christopher Andrés*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Influencia Del Campo Eléctrico En La Viscosidad De Soluciones Poliméricas* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 12 de abril del 2019

Firma: 
.....

JIMÉNEZ JARAMILLO CRISTOPHER ANDRÉS

C. C.: 1105640658



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Jiménez Jaramillo, Cristopher Andrés* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Influencia Del Campo Eléctrico En La Viscosidad De Soluciones Poliméricas* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

Sangolquí, 12 de abril del 2019

Firma: 

JIMÉNEZ JARAMILLO CRISTOPHER ANDRÉS

C. C.: 1105640658

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a Dios, que me guió y me dio esta hermosa familia de quienes recibí, de manera incondicional, aliento y cariño durante toda mi vida; especialmente a mi madre, la razón por la que elegí ser ingeniero, ya que ella con su amor me brindaba las fuerzas necesarias para seguir adelante, sin esperar nada a cambio.

A mi director de tesis Christian, que lo considero un amigo más, por su apoyo y ayuda para culminar de manera exitosa mi carrera de Ingeniería Mecánica.

A mis profesores Roberto Buenaño, Sivananda Delgado, Angelo Villavicencio, Luis Carrión, José Perez y Roberto Gutierrez quienes, aparte de conocimientos, me brindaron consejos para formarme como persona.

A mis compañeros y amigos: Alex De La Cruz mi camarada desde el colegio, Esteban Arévalo mi amigo y compañero de carrera desde prepo de quien recibí gran apoyo, Andrés Garcés mi querido compañero de grupo de trabajo que nunca me abandonó a excepción de la tesis, André Soria que me apoyó con sus conocimientos siempre que necesitaba, Franklin Salguero el cual fue un amigo incondicional, Jefferson Gutierrez a pesar de ser una carga siempre fuiste un gran amigo y estuviste siempre que necesité, Esteban Sandoval un gran apoyo en momentos difíciles con palabras adecuadas, Massiel Zurita, mi querida chiflada, que nunca me falló y siempre que la necesite estuvo ahí; y, finalmente, Andrea Morillo que se merece estar en primer lugar porque con su amor y comprensión me ayudo a ser la persona que soy.

AGRADECIMIENTO

A mi Dios por ponerme en esta carrera que nunca me gustó, pero lo hizo para en un futuro glorificarse.

A la Universidad de las Fuerza Armadas ESPE por la oportunidad de instruirme y realizar mis estudios superiores en la carrera de Ingeniería Mecánica.

Al personal docente del área de reología, Luis Carrión y Nicolas Páez que me apoyaron en la parte experimental de mi trabajo de titulación.

De manera especial al Ing. Christian Narváez director de mi tesis por sus consejos, responsabilidad y asesoría.

A mi amigo Romario le agradezco por su apoyo en el desarrollo de mi tesis.

A mi familia, familiares amigos y conocidos por la colaboración en el desarrollo y culminación de la presente tesis

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Y CERTIFICADO DEL DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
INDICE DE ILUSTRACIONES	vii
INDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción:.....	1
1.2. Antecedentes:.....	2
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.4. Alcance del proyecto.....	4
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II	6
2. ESTADO DEL DESARROLLO	6
2.1. Electrorreología (ER).....	6
2.2. Estabilidad en las gotas.....	10
CAPÍTULO III	12
3. EXPERIMENTACIÓN:	12
3.1. Diseño Experimental.....	12
3.2. Preparación de la muestra a utilizar.....	15

3.3. Ensayos reológicos.....	17
3.3.3. Ensayo Electrorreológicos.....	18
3.3.4. Comparación de resultados con cámara de alta velocidad.....	19
CAPÍTULO IV.....	21
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS.....	21
4.1. Ensayos de caracterización Reológica de las soluciones polimérica PVP+ DMF, PVP+ Etanol.....	21
4.2. Análisis de Módulo Elástico y Complejo de las soluciones poliméricas PVP+ DMF y PVP +Etanol.....	24
4.3. Análisis del Angulo de fase de la solución polimérica PVP+ DMF/Etanol.....	31
4.4. Análisis de Módulo Viscoso de la solución polimérica PVP 30%+ DMF y PVP+Etanol.....	33
4.5. Análisis de Módulo Viscoso de la solución polimérica PVP disueltas en DMF y PVP+ Etanol a diferentes concentraciones.....	40
4.6. Análisis de las imágenes realizadas con la cama de alta velocidad a las soluciones poliméricas de PVP + DMF y PVP+Etanol.....	43
4.7. Análisis de la simulación realizada en OpenFOAM, utilizando soluciones poliméricas de PVP + DMF y PVP +Etanol.....	45
CAPITULO V.....	47
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:.....	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento reológico, en estado estacionario.....	7
Figura 2. Ejemplos de PVP a diferentes concentraciones de 10% 13% 15% 20% 25% 30%.....	9
Figura 3. C. Taylor al aplicar un V. a la S. Polimérica.....	10
Figura 4. Presiones en una Gota.....	10
Figura 5. Equipo de electrohilado.....	16
Figura 6. Balanza eléctrica.....	16
Figura 7. Agitador Magnético.....	17
Figura 8. Reómetro DHR-2.....	19
Figura 9. Figura de fluidez de las soluciones poliméricas.....	22
Figura 10. Figura de viscosidad de las diferentes soluciones.....	23
Figura 11. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en PVP + DMF.....	25
Figura 12. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en PVP + Etanol.....	26

Figura 13. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en PVP + DMF.....	27
Figura 14. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en PVP + Etanol.....	28
Figura 15. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en PVP + DMF.....	29
Figura 16. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en PVP + Etanol.....	30
Figura 17. Angulo de fase en bruto a diferentes porcentajes de esfuerzo.....	32
Figura 18. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 9000.....	34
Figura 19. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 1000.....	35
Figura 20. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 5000 a 9000.....	36
Figura 21. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 9000.....	37
Figura 22. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 1250.....	38
Figura 23. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 5000 a 9000.....	39
Figura 24. Módulo viscoso en función de la concentración de las soluciones.....	41
Figura 25. Módulo viscoso en función de la concentración de 30 %.....	42
Figura 26. Foto de la cámara de alta velocidad de la.....	43
Figura 27. Foto de la cámara de alta velocidad de.....	44
Figura 28. resultado de la simulación de la solución.....	45
Figura 29. resultado de la simulación de la solución.....	46
INDICE DE TABLAS	

Tabla 1 Niveles y tratamientos del diseño experimental.....	14
Tabla 2 Resultados del peso masa a diferentes concentraciones.....	15
Tabla 3 Viscosidad Promedio de las soluciones.....	21
Tabla 4 Viscosidad de las soluciones a diferentes voltajes.....	33

RESUMEN

En la actualidad la técnica de electrohilado es muy utilizado en aplicaciones militares, medicas, sin embargo, no existe un estudio a profundidad de como incide el campo eléctrico en la viscosidad de las soluciones que son utilizadas en esta técnica. El presente trabajo busca como influye este campo eléctrico en la viscosidad de soluciones poliméricas, mediante el uso de un reómetro, cámara de alta velocidad y una simulación en OpenFOAM. Se utilizaron dos diferentes solventes, DMF y etanol los cuales fueron utilizados en soluciones de 10% 20% y 30% dando un total de 6 soluciones estudiadas, se realizaron ensayos de caracterización reológica, estudios de electroreología utilizando barridos de amplitud a voltajes de 0,1,2,3,4 [KV], para ver como variaba la viscoelasticidad, con la cámara de alta velocidad y la simulación numérica se observó como variaba el tamaño del menisco en la gota de la solución polimérica. Luego de realizar los ensayos y pruebas correspondientes se concluyó que: las 6 soluciones tienen un comportamiento newtoniano, la parte elástica no pudo ser medida por el instrumento ya que la inercia de la maquina superaba a la de la solución, la parte viscosa aumento de manera paulatina al aumentar el voltaje siendo más viscosa la disuelta en etanol a 30% a un voltaje de 4 KV, en las fotografías y resultados de la simulación se observó que la disuelta en DMF fluye con mayor facilidad y la de etanol tenía mayor resistencia.

PALABRAS CLAVES:

- **ETANOL**
- **DIMETILFORMAMIDA**

- **POLIVINILPIRROLIDONA**

ABSTRACT

At present, the electrospinning technique is widely used in military and medical applications, however, there is no in-depth study of how the electric field affects the viscosity of the solutions used in this technique. The present work looks at how this electric field influences the viscosity of polymer solutions, through the use of a rheometer, high speed camera and a simulation in OpenFOAM. Two different solvents, DMF and ethanol were used, which were used in solutions of 10% 20% and 30% giving a total of 6 studied solutions, rheological characterization tests were carried out, electroreology studies using scans of amplitude at voltages of 0, 1,2,3,4 [KV], to see how the viscoelasticity varied, with the high speed camera and the numerical simulation it was observed how the size of the meniscus varied in the drop of the polymer solution.

After performing the tests and corresponding tests it was concluded that: the 6 solutions have a Newtonian behaviour, the elastic part could not be measured by the instrument since the inertia of the machine exceeded that of the solution, the viscous part increased in a way gradually increasing the voltage being more viscous dissolved in ethanol at 30% at a voltage of 4 KV, in the photographs and simulation results it was observed that the dissolved in DMF flows more easily and the ethanol had greater resistance.

KEYWORDS:

- **ETHANOL**

- **DIMETHYLFORMAMIDE**
- **POLIVINILPIRROLIDONA**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción:

Cuando a un fluido se le aplica un campo eléctrico, sus partículas ya no poseen un comportamiento normal, estas comienzan a tener movimiento con el cual se comienza a crear una red tridimensional [CITATION Mel93 \l 12298]. El estudio de la electroreología tiene como objetivo realizar un análisis cuando se aplica un diferencial de potencial a un fluido y verificar sus propiedades reológicas cuando está estimulado, estas propiedades por ejemplo son módulo de corte, esfuerzo de cedencia, viscosidad, etc., [CITATION Rej03 \l 12298], al momento que se realiza este proceso se busca que las fuerzas eléctricas sean lo suficientemente predominantes en el proceso para que se pueda vencer la tensión superficial del fluido; siempre que suceda estas condiciones en la tensión superficial y en un caudal pequeño se evidencia el menisco en el capilar, el cual se encuentra bajo la influencia de un campo electrostático y esta a su vez nos genera por inducción una carga en la superficie del líquido. Los resultados que se esperan ver variarían entre diferentes concentraciones que se utilicen para la elaboración del fluido con el que se experimenta [CITATION Gar95 \l 12298].

El equilibrio del fluido y la caracterización de sus propiedades son fácilmente manejables y utilizados en varias áreas; como la automotriz (frenos, amortiguadores y embragues) aplicaciones médicas, ópticas, de impresión y militares. [CITATION Lop03 \l 12298].

La tendencia actual en el ámbito informático así como en el desarrollo de nuevas tecnologías, nos permiten realizar nuevas caracterizaciones en tiempos cortos con una tendencia a resultados precisos y fiables [CITATION NIE04 \l 12298], al realizar consideraciones de simulación numérica con software de dinámica de fluidos computacional (CFD); estos permiten llegar a las soluciones de problemas planteados de mecánica de fluidos utilizando la formulación numérica de Navier- Stokes y con Reynolds[CITATION Car11 \l 12298].

1.2. Antecedentes:

El estudio de la técnica para la utilización de un campo eléctrico para lograr la variación del tamaño de la gota en un fluido fue desarrollada y estudiada por Rayleigh, [CITATION Ray82 \n \t \l 12298], pero la automatización como tal de la técnica fue realizado por Zeleny, [CITATION Zel14 \n \t \l 12298], conocida de manera común como electrohidrodinámica (EHD). La derivación y sustentación matemática fue desarrolla en, [CITATION Tay64 \n \t \l 12298], por Taylor, el cual restringió a un cierto volumen utilizando condiciones hidrostáticas. La teoría de gotas cargadas establece que, se generará una fuerza electrostática dentro de la misma siempre que se aplique un campo cargado eléctricamente a cualquier gota, conociéndola a esta como la fuerza de Coulomb. Esta compite a su vez con la fuerza superficial de la gota, cuando la fuerza que se puede aplicar es capaz de superar la fuerza superficial de la gota se manifiesta la tensión superficial, la gota se fracciona en gotas de tamaños de escala micro y nano[CITATION Duq13 \l 12298].

El fenómeno conocido como Cono de Taylor, se da cuando la superficie del fluido conductor está cargado por encima del umbral, esto hace que sea notable una superficie inestable, la cual desarrolla una forma semejante a un cono [CITATION Tay64 \l 12298]; cuando a la contracción progresiva de la inestable gota está cargada dentro de un cono, entonces desde las gotas más pequeñas serán expulsadas tan pronto como la tensión superficial sea superada por la fuerza de Coulomb. Rayleigh predijo un límite para determinar la desintegración de la gota, el mismo que fue llamado el límite de Rayleigh (Ec.1). Donde (q) es la carga de la superficie de la gota, (ϵ) la permitividad del medio circundante, (γ) la tensión superficial de líquido y (R) el radio de la gota. Basado en estas ecuaciones las partículas mono dispersas pueden ser fabricadas usando los parámetros apropiados [CITATION Zar09 \l 12298]

$$q = 8 \pi \sqrt{\epsilon_o \gamma} R^3 \quad (1)$$

A través de la técnica de la EHD se han realizado varias investigaciones para producir partículas y fibras de varios tamaños. El presente proyecto de titulación busca la aplicación de la EHD en los fluidos y tendrá una comprobación a través de una simulación con el software OpenFoam para conocer cómo es la interacción del campo eléctrica con las fuerzas viscosas de una solución polimérica a diferentes concentraciones.

1.3. Justificación e importancia

En el Ecuador el desarrollo sobre la utilización de la Electrohidrodinámica, para la variación de los tamaños de las estructuras, los cuales son usados ampliamente en la administración de fármacos, agricultura, síntesis de nanopartículas, electrónica, etc.; no es significativo ya que no existe una variedad de estudios a nivel de pregrado sobre el tema (solo en la Universidad de las Fuerzas Armadas existen estudios relacionados).

Estas estructuras han sido producidas y manipuladas con el uso de tecnologías comunes, entre las más conocidas la polimerización por suspensión y emulsión; estos procesos tienen inconvenientes al no poder trabajar con una amplia variedad de polímeros. Existen pocas investigaciones de la influencia de las fuerzas viscoelásticas en la formación del cono de Taylor, se intenta realizar mediante la EHD como una forma alternativa para la verificación de la variación de los tamaños de los meniscos, con esto se desea obtener estructuras microscópicas de la una solución con soluto Polivinilpirrolidona (PVP) que estará disuelto en Dimetilformamida (DMF) y Etanol, el cual es utilizado en aplicaciones de medicina. Se realizará una validación de los datos experimentales mediante la simulación del software OpenFoam.

1.4. Alcance del proyecto

El presente proyecto de titulación tiene como alcance la variación de parámetros de campo eléctrico, con la finalidad de realizar la variación del tamaño del menisco de la concentración del fluido, aplicando la técnica de la electrohidrodinámica. Mediante la experimentación se espera determinar el mejor parámetro de campo eléctrico para la estabilidad del menisco, y buscar la relación campo eléctrico- viscosidad de la solución; además, se realizará un ensayo de electrorreología de la solución polimérica para determinar la influencia del campo eléctrico en la viscosidad de la solución, los cuales estarán validados a treves de una simulación en OpenFoam. A partir de esta investigación se podrá tener una mejor comprensión y datos reales de como incide el campo eléctrico y viscosidad en el tamaño del menisco, con lo cual se pretende obtener mayor estabilidad para las futuras investigaciones y aplicaciones de electrohidrodinámica. Para esta investigación se utilizará una solución de un polímero

Polivinilpirrolidona (PVP) de bajo peso molecular disuelto en Dimetilformamida (DMF) y Etanol.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Determinar la influencia del campo eléctrico en la viscosidad de soluciones poliméricas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Validar mediante simulación en OpenFoam los datos obtenidos experimentalmente de como incide la variación del campo eléctrico en el tamaño del menisco de la concentración del fluido newtoniano.
- Determinar la influencia del campo eléctrico en la solución polimérica mediante un ensayo de electrorreología.
- Analizar la uniformidad de los datos, para de esta manera ir variando los parámetros que intervienen en el proceso, conjuntamente con los datos de la simulación.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL DESARROLLO

2.1. Electrorreología (ER)

Al momento de realizar un estudio ER entramos en el campo de la reología; la cual se conoce como la ciencia que estudia la relación del comportamiento de los fluidos con la materia; basándose en el comportamiento de la deformación de los materiales y el esfuerzo que se aplica[CITATION BAR98 \l 12298]; esto se utiliza como punto de partida para estudiar a los fluidos que se encuentran bajo la influencia de un campo eléctrico como la técnica del Electrospinning, que permite la formación de fibras y partículas poliméricas a escala nano y micrométricas mediante el uso de fuerzas electrostáticas. El primer estudio documentado de esta particularidad data de los años cuarenta; cuando William M. Winslow realizó la experimentación de partículas de silicagel y aceite, este al encontrarse sin ningún estímulo se comportaba y se caracterizaba como un fluido totalmente viscoso y al exponerse a un voltaje se comportaba como una masa sólida[CITATION Ant94 \l 12298]. Los Fluidos ER se los define como suspensiones de partículas que no son conductoras sumamente finas y que su tamaño puede variar desde nanómetros a micrómetros; éste es un fluido eléctricamente aislado que cambian sus propiedades reológicas como la viscoelasticidad de manera no permanente[CITATION GRA17 \l 12298].

Las características reológicas de un fluido ER dependen del acoplamiento de las respuestas mecánicas y eléctricas del material, las cuales se pueden comprender a través de un diagrama de variación de la tensión de cizallamiento frente a la velocidad de cizallamiento, Figura 1[CITATION GRA17 \l 12298].

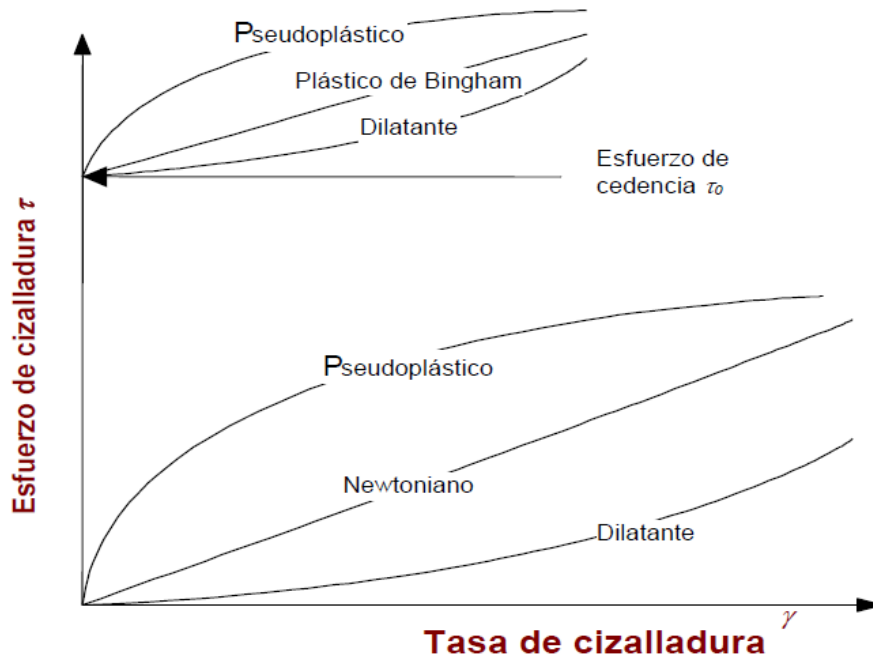


Figura 1. Comportamiento reológico, en estado estacionario
Fuente [CITATION Ste92 \l 12298]

Este gráfico se lo conoce como el de fluidez y gracias al mismo se puede tener un panorama claro de qué tipo de comportamiento tiene el fluido y una predicción a las respuestas que se puede esperar después de aplicar diferentes estímulos. De esta manera observar cómo es afectada una de las propiedades de los fluidos como la viscosidad, elasticidad y viscoelasticidad, que al momento de realizar la caracterización reológica nos encontramos con la particularidad que para los fluidos responden a las leyes de Newton, mientras que los sólidos responden a la ley de Hooke; no obstante existen materiales compuestos que no responden de manera precisa a estas leyes antes mencionadas; por lo cual sale la terminología de viscoelasticidad; estos son aquellos cuya deformación y tasa de deformación están en función del esfuerzo, y estos son polímeros con peso molecular elevado. La viscoelasticidad es la parte elástica de un sólido (ley de Hooke), y la

parte viscosa de un líquido (ley de Newton); así cuando se aplica la fuerza a un sólido este se deforma hasta que el esfuerzo aplicado se culmine, haciendo que la deformación vuelva a la posición inicial y si la misma fuerza fuese aplicada a un fluido viscoso se deformará pero no recuperará su estado inicial [CITATION Ste92 \l 12298]. Un comportamiento intermedio es el viscoelástico, en el cual se recupera parte de la deformación después del esfuerzo aplicado. La forma más simple de describir la viscoelasticidad lineal es haciendo uso de modelos mecánicos, que son combinaciones de elementos viscosos con elementos lineales, el desarrollo de esto se basa en el modelamiento en serie de del acoplamiento elástico y viscoso el propósito es aplicar una fuerza sobre el polímero, el mismo que se comportará de forma dual por lo tanto ofrecerá una deformación instantánea que estará definida por la ley de Hooke, la cual no cambiara con el paso del tiempo y por otro lado lo viscoso el cual incrementara según el paso del tiempo según se indica en la ley de Newton, esto se evidencia en la ecuación 2; donde ϵ es la deformación total del polímetro, t el tiempo σ_0 la tención aplicada y η la viscosidad del polímero, que es la formulación de Maxwell y a su vez el modelamiento más utilizado.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad 2$$

Para el análisis de la viscoelasticidad además de los modelamientos matemáticos se tiene el número de Deborah, que da una representación clara y precisa del comportamiento y propiedades que rigen el fluido y viene dado por la ecuación tres, es importante indicar que se representa la razón de tiempo de relajación con la de observación; si es mayor que 1 es elástico; ya que el tiempo de relajación que tiene un sólido se lo considera virtualmente infinito; mientras que el tiempo del agua es muy corto, estableciendo que si es menor a uno es un fluido viscoso [CITATION Bil78 \l 12298].

$$D_e = \frac{t_m}{t_o}$$

3

En la electrohidrodinámica se estudia el electrohilado, este es un proceso en el cual se forman fibras finas de tamaños manométricos y micrométricos; consiste en aplicar voltajes altos a una solución polimérica el cual al encontrarse cargada eléctricamente se deforma en hilos que se entrelazan y se dirigen hacia la zona de más bajo potencial, además los resultados que se esperan ver variaran entre las diferentes concentraciones que se utilicen para la elaboración del fluido con el que se experimenta, [CITATION Tor13 \l 3082], como se puede ver en la grafica 2, la cual fue un estudio realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

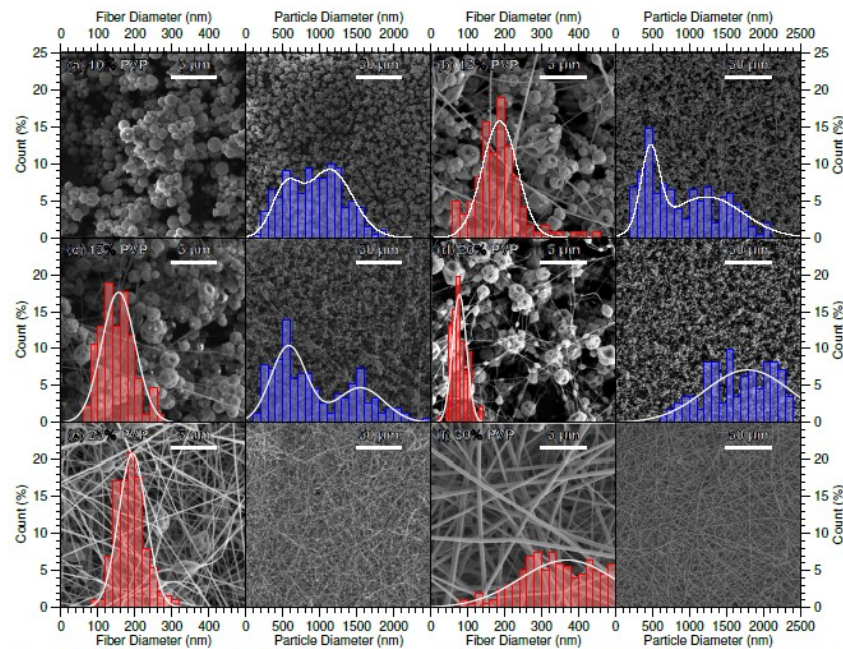


Figura 2. Ejemplos de PVP a diferentes concentraciones de 10% 13% 15% 20% 25% 30%

Fuente: Lab. Reología (ESPE)

Esto se debe a que cuando en el campo eléctrico las fuerzas de la tensión superficial son superadas por las fuerzas eléctricas y como consecuencia se obtiene un hilo fino de la solución cargada, la cual es expulsada de la punta del cono de Taylor, se modifican las

propiedades viscoelásticas puesto que existe una alineación de las partículas que la conforman (ver Figura 3) [CITATION Ari18 \l 3082].

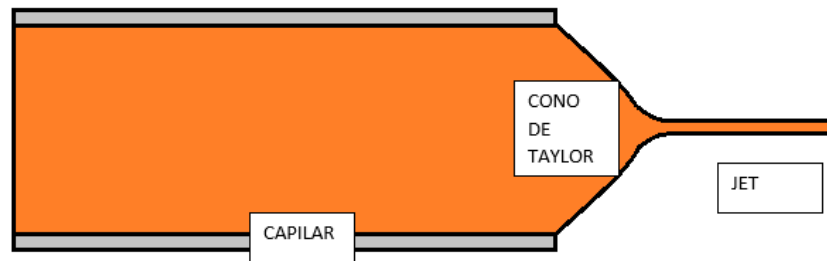


Figura 3. C. Taylor al aplicar un V. a la S. Polimérica

Fuente [CITATION Ari18 \l 12298]

2.2. Estabilidad en las gotas

La tensión superficial es la encargada de mantener la forma esférica de la gota (ver Figura 4), cuando la gota adquiere una carga está se acumula en la superficie de la gota tratando de buscar la estabilidad y que mantenga su forma esférica [CITATION Gom10 \l 3082].

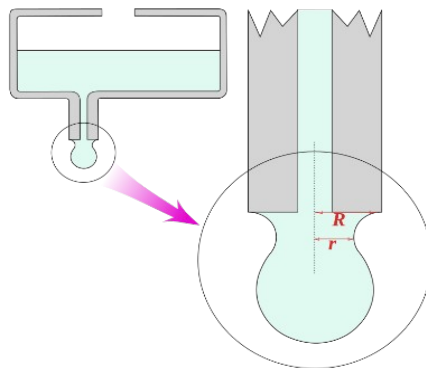


Figura 4. Presiones en una Gota

Fuente: [CITATION Str70 \l 3082]

Esto sería similar a un conductor esférico el cual tiene un radio r y su capacidad de conductor sería el cociente de la carga positiva total y la diferencia de potencial entre los dos conductores por el que está formado. (Ec. 4) [CITATION Lop12 \l 3082]

$$C = 4 * \pi * \epsilon_0 * r \quad 4$$

Rayleigh predijo un límite para determinar la desintegración de la gota, el mismo que fue llamado el límite de Rayleigh (Ec.1). Basándose en estas ecuaciones las partículas mono dispersas pueden ser fabricadas estableciendo los parámetros apropiados [CITATION Zar09 \l 12298].

Cuando se habla de la fuerza del campo eléctrico como la dependencia que tiene de la velocidad de cizalla en la ER, se la puede representar de una manera fácil y tangible a través del número de Mason, ecuación 5 [CITATION Ign \l 12298].

$$Mn = \frac{n_m \dot{\gamma}}{2 \epsilon_0 \beta_{eff}^2 E_0^2} \quad 5$$

Este modelamiento para la investigación de fluidos ER ayuda en la simulación de partículas que se encuentran en suspensiones y movimiento; pero existen aún problemas al momento que se desarrolla la experimentación, puesto que no se obtiene la repetibilidad de todos los datos cuando se utiliza altas cizallas y alto campo eléctrico [CITATION Gin95 \l 12298].

CAPÍTULO III

3. EXPERIMENTACIÓN:

En el presente capítulo se realiza la explicación de forma detallada el proceso de experimentación para el siguiente proyecto de tesis.

3.1. Diseño Experimental

El método o diseño experimental es una herramienta utilizada en la estadística, en la cual se utiliza para poder determinar las mínimas repeticiones de las pruebas o técnicas que se van a utilizar, tomando en cuenta que nos recomienza realizar como mínimo 3 repeticiones por cada tratamiento. [CITATION Rub01 \l 3082].

Los aspectos fundamentales para la selección del diseño experimental que se tiene que tomar en cuenta son:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Estos aspectos no necesariamente son independientes entre sí, pero si se debe tomar en cuenta de manera separada para tener una mejor apertura y análisis de los datos. [CITATION

Dia09 \l 3082]; los métodos más utilizados al momento del desarrollo del diseño experimental se tienen:

1. Diseño para comparar dos o más tratamientos.
2. Diseño para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta.
3. Diseño para optimización de procesos
4. Diseños robustos
5. Diseños de mezclas

Método factorial: este método es el recomendado para poder estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta. Dentro de los métodos factoriales tenemos el tratamiento mixto, el cual es utilizado cuando se tiene factores o variables con diferentes niveles [CITATION Dia09 \l 3082].

De esta manera tenemos como nuestra variable o factor principal el campo eléctrico que será conocido ahora como m con 5 niveles, y como secundaria las concentraciones conocida como n, de las soluciones con 3 niveles, en la ecuación 6 podemos observar, que el número de pruebas a desarrollarse son 45.

$$3 \times (A \times B) = C \quad 6$$

Donde A es el nivel del primer factor, B el nivel del segundo, todo esto multiplicado

por 3 que son las veces mínimas que se repite una experimentación dando como resultado el número de pruebas C.

$$3 \times (5 \times 3) = 45$$

Se puede ver los tratamientos en la tabla 1, el cual coincide con el resultado del método mixto ya que se realizó tres repeticiones por cada ensayo.

Tabla 1

Niveles y tratamientos del diseño experimental

Nivel de Campo Eléctrico	Nivel de Concentración	Tratamiento
m1	n1	1
m2	n1	2
m3	n1	3
m4	n1	4
m5	n1	5
m1	n2	6
m2	n2	7
m3	n2	8
m4	n2	9
m5	n2	10
m1	n3	11
m2	n3	12
m3	n3	13
m4	n3	14
m5	n3	15

3.2. Preparación de la muestra a utilizar

El estudio empezó con la preparación de la solución polimérica, que tuvo como soluto PVP y solventes etanol y DMF, las cuales fueron realizadas a tres diferentes concentraciones diez, veinte y treinta por ciento de soluto. La cantidad de soluto y solvente fueron calculadas con las ecuaciones 6, 7 y sus valores evidenciados en la tabla 2.

$$\%concentracion = \frac{\text{peso del soluto}}{\text{peso total de la solucion}} * 100\% \quad 6$$

$$\text{peso del solvente} = \text{peso total de la solucion} - \text{peso del sol} \quad 7$$

Se utilizó como peso total de la solución 25 gr.

Tabla 2

Resultados del peso masa a diferentes concentraciones.

Concentración [%]	Peso del soluto [gr]	Peso del solvente [gr]
10	2.5	22.5
20	5	20
30	7.5	17.5

Las soluciones poliméricas al 10, 20 y 30 % se prepararon a condiciones de humedad 41%-52% y temperatura ambiente de 20°C - 24°C, las cuales fueron electrohiladas en el equipo de la Figura 5. Donde 1 es el caudalímetro, 2 el colector, 3 hidrómetro, 4 base del colector, 5 fuente, 6 cámara, 7 computadora

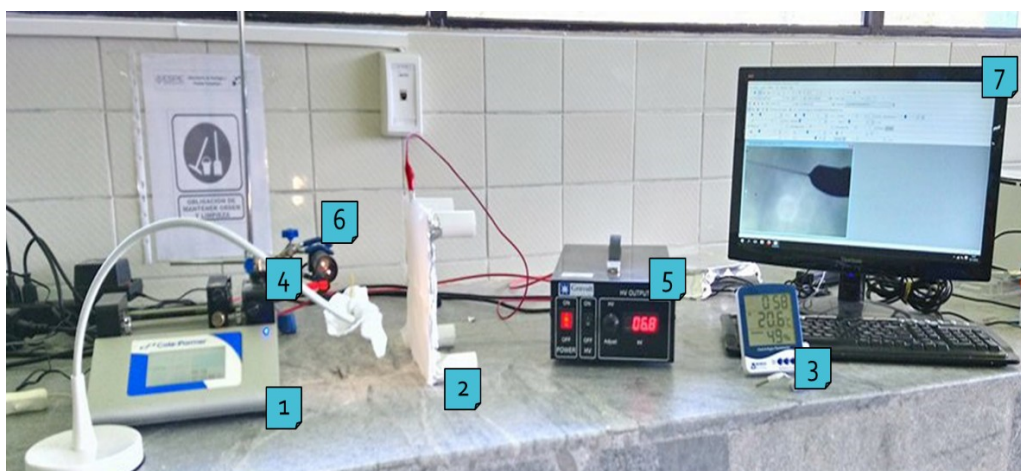


Figura 5. Equipo de electrohilado

El procedimiento que se utilizó para la preparación fue el siguiente:

- Se estableció el peso total de solución a utilizar.
- Se calculó con la ecuación 6 y 7 el peso de soluto y solvente para cada solución.
- Se colocó un recipiente en la balanza electrónica, se añadió el soluto y solvente en las porciones que se indica en a tabla 1, según el tipo de concentración que se deseaba conseguir, ver Figura 6.



Figura 6. Balanza eléctrica

- Se añadió un agitador en el recipiente y se tapó evitando fugas, posteriormente se colocó en una plancha agitadora magnética por ocho horas con la finalidad de que exista una buena homogenización, ver Figura 7.



Figura 7. Agitador Magnético

3.3. Ensayos reológicos

Para conocer con qué tipo de fluidos se iba a trabajar se realizó la caracterización reológica de todas las soluciones poliméricas se utilizó el reómetro tipo DHR-2, ver Figura 8, del Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El procedimiento para el uso de este equipo fue explicado y supervisado por el personal que se encuentran en dicho laboratorio; los pasos indicados fueron:

- Montar las geometrías de cilindros concéntricos en el Reómetro.
- Realizar la calibración del Reómetro utilizando el software Tríos.

- Colocar la cantidad de solución en la geometría como se recomienda en la geometría.
- Escoger el ensayo oscilatorio de amplitud, y establecer las condiciones de 140 [1/s] para la velocidad, la cual fue calculada con la ecuación de Reynolds en estado laminar, utilizando la densidad de etanol y del DMF que se aproximan a la del agua (ver ecuaciones 8).

$$R_e = \frac{\rho v D_H}{\mu} = 4000 \quad 8$$

- Una taza de corte de “2.43743 [1/s]” a “134.059 [1/s]”.
- Se hizo por triplicado cada ensayo y se calculó un promedio para tener un resultado fiable.
- Se realizó un barrido de flujo con una velocidad de 140 [1/s] por 20 segundos, posteriormente un barrido de 0 [1/s] en todos los experimentos para garantizar que existe una relajación y un borrado de almacenamiento de estructura.

3.3.3. Ensayo Electrorreológicos

Para los ensayos de electrorreología se realizó el montaje, calibración y puesta en marcha según lo recomendado por el encargado del laboratorio; los pasos a utilizar fueron:

- Montar las geometrías de electrorreología en el Reómetro.
- Realizar la calibración del Reómetro utilizando el software Tríos.
- Colocar la cantidad de solución en la geometría como se recomienda en la geometría.
- Se utilizó una taza de corte de “2.43743 [1/s]” a “134.059 [1/s]”

- Un voltaje de 0, 1000,2000,3000,4000 V para generar un campo eléctrico a una distancia de 0.0015 m, como condición electroreológico.
- Se hizo por triplicado el ensayo y se calculó un promedio para tener un resultado fiable.
- Se realizó un barrido de flujo con una velocidad de 140 [1/s] por 20 segundos, un segundo barrido de 0 [1/s] en todos los experimentos para garantizar que existe una relajación y un borrado de almacenamiento de estructura.



Figura 8. Reómetro DHR-2

3.3.4. Comparación de resultados con cámara de alta velocidad

Para comprender como se ve involucrado el campo eléctrico en la formación del menisco de la solución polimérica, se utilizó una cámara de alta velocidad del laboratorio de Reología y se realizó la toma de fotografías de la formación del cono en las soluciones a distintos voltajes, en el Electrospinning para de esta manera evidenciar la variación del tamaño. El procedimiento realizado fue:

- Montar la cámara en la base que tiene el mismo equipo.

- Por medio de una jeringa de 10 ml colocar la solución que corresponde hasta llegar a los 3 ml aproximadamente. Se procede a ensamblar el tubo capilar con la jeringa y se coloca la jeringa en la bomba de inyección.
- Una vez que se tiene la jeringa puesta en la bomba de inyección se procede a enfocar la cámara de acercamiento hacia la punta del capilar, esto se hace con el fin de observar el cono de Taylor y que este sea estable durante todo el proceso.
- Con el software de la cámara de alta velocidad realizar la grabación de como se ve afecta la gota a distintos campos eléctricos, el cual es modificado por la fuente de corriente directa.

Por otro lado, para realizar la simulación en el Software OpenFOAM, se basa en la relación de continuidad y las leyes de conservación. Y los pasos que se realizaron fueron de:

- Aplicar las condiciones iniciales y de contorno al dominio numérico
- Resuelve la ecuación de fracción de volumen.
- Calcular el campo eléctrico E
- Resuelve la densidad de carga ρ_e
- Calcule la fuerza eléctrica F_e , a partir de los valores de E y ρ_e
- Calcula el vector de velocidad U^* , resolviendo la ecuación de momento.
- El uso de un algoritmo PIMPLE calcula y corrige el campo de velocidad U^{**} .
- Solución.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

En este capítulo se presenta el análisis respectivo del presente trabajo de titulación. En el análisis de turbulencia se tomó la decisión de utilizar el equipo con una tasa de corte de “134,059 1/s” para garantizar que el fluido se encuentre en una zona laminar y no turbulenta.

4.1. Ensayos de caracterización Reológica de las soluciones polimérica PVP+ DMF, PVP+ Etanol

Para el análisis del comportamiento viscoso de las soluciones polimérica; nos apoyamos en los Figuras de fluidez (Figura 9) y viscosidad (Figura 10), por lo tanto podemos concluir que las 6 soluciones estudiadas tienen un comportamiento totalmente newtoniano; ya que se considera como fluido Newtoniano a todo aquel que su esfuerzo cortante responda de manera proporcional a su tasa de corte como en la Figura 9, por otro lado si su viscosidad se mantiene constante durante todo el periodo que se aplica diferentes tasas de corte como vemos en la Figura 10 [CITATION FOX95 \l 12298]. Se observa las viscosidades y desviación estándar promedio de todas las mediciones realizadas en la tabla 3 donde podemos afirmar que la viscosidad de la solución a más porcentaje de soluto es más viscosa tanto para la disuelta en Etanol como para la disuelta en DMF.

Tabla 3*Viscosidad Promedio de las soluciones*

Solución	Viscosidad [Pa.s]	Desviación
PVP 30% + DMF	0,0782024	0,00118427
PVP 30% + Etanol	0,1026931	0,001218655
PVP 20% + DMF	0,01719388	4,9759E-05
PVP 20% + Etanol	0,02900481	7,83338E-05
PVP 10% + DMF	0,0042697	1,20945E-05
PVP 10% + Etanol	0,00776539	2,48301E-05

Figura de Fluidez a diferentes concentraciones

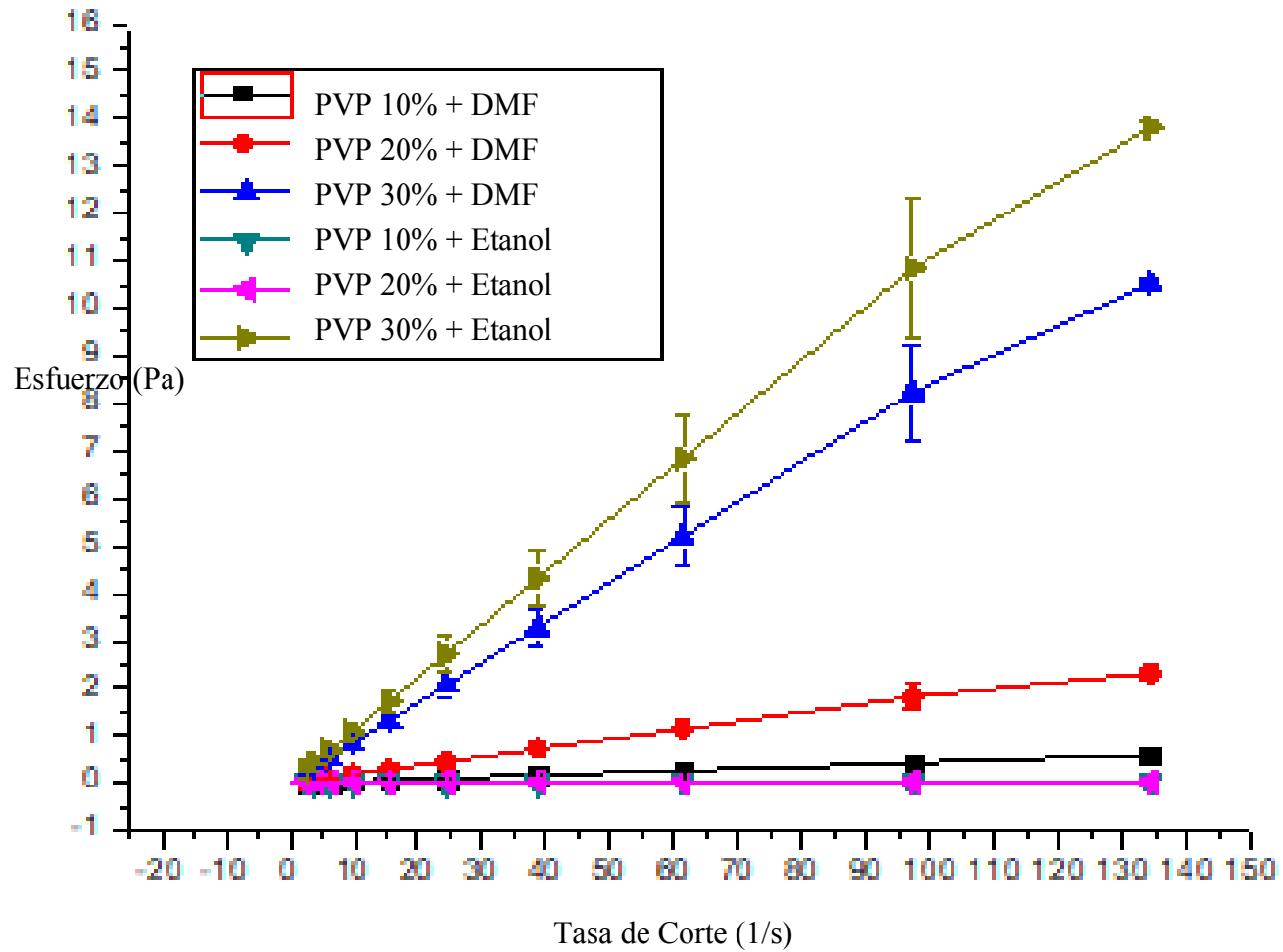
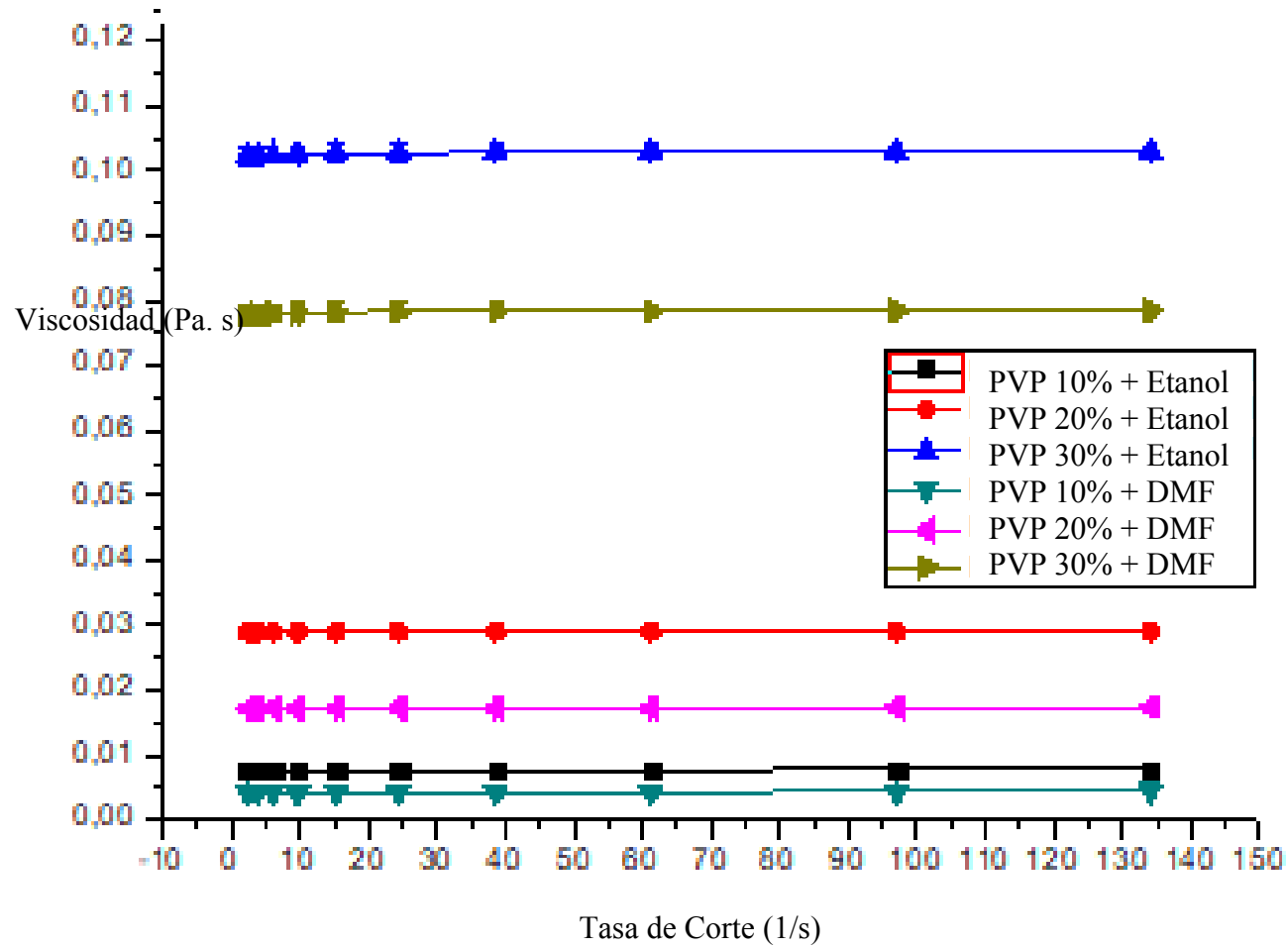
*Figura 9.* Figura de fluidez de las soluciones poliméricas

Figura de Viscosidad a diferentes concentraciones

*Figura 10.* Figura de viscosidad de las diferentes soluciones

4.2. Análisis de Módulo Elástico y Complejo de las soluciones poliméricas PVP+ DMF y PVP +Etanol

Para realizar el análisis del módulo elástico y complejo de las soluciones poliméricas de PVP + DMF y PVP + Etanol, se empleó el reómetro DRH-2 con un ensayo oscilatorio a una frecuencia de un (1) Hz, aplicando voltajes de 0 hasta los 4000 V para generar diferentes campos eléctricos, con la finalidad de ver como variaba sus propiedades al aumentar el campo eléctrico, es importante destacar que se aplicó un porcentaje alto de esfuerzo con el propósito de observar como varia durante este periodo. En las ilustraciones 11 y 12 están expuestas a un voltaje de 0[V], 13 y 14 a 2000 [V], y en las ilustraciones 15 y 16 a 400 [V].

En las ilustraciones 11 a la 16, se observa de manera general dos puntos importantes; en una primera instancia que el módulo viscoso (loss modulus) en las soluciones poliméricas de PVP + DMF y la de PVP + Etanol, posee una tendencia a incrementar dicho modulo a mayores niveles de concentración, sin importar a qué tipo de campo se vean expuesto, por lo tanto desde el punto de vista reológico se tiene que uno de los principales características es la cantidad y calidad de solvente que se utiliza al momento de realizar soluciones poliméricas; esta afirmación se la puede corroborar con el estudio de Peer, [CITATION Pee14 \n \t \l 12298], el cual menciona que las propiedades reológicas se ven mejoradas con la calidad de los solventes. En segundo aspecto, se observa que el módulo elástico (storage modulus) tiene valores insignificantes que tienden a cero, lo cual es causado por una baja inercia de la muestra, por tal motivo se realizó un estudio con el ángulo de fase en bruto para comprender la respuesta viscoelástica de las soluciones.

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en la solución de PVP + DMF

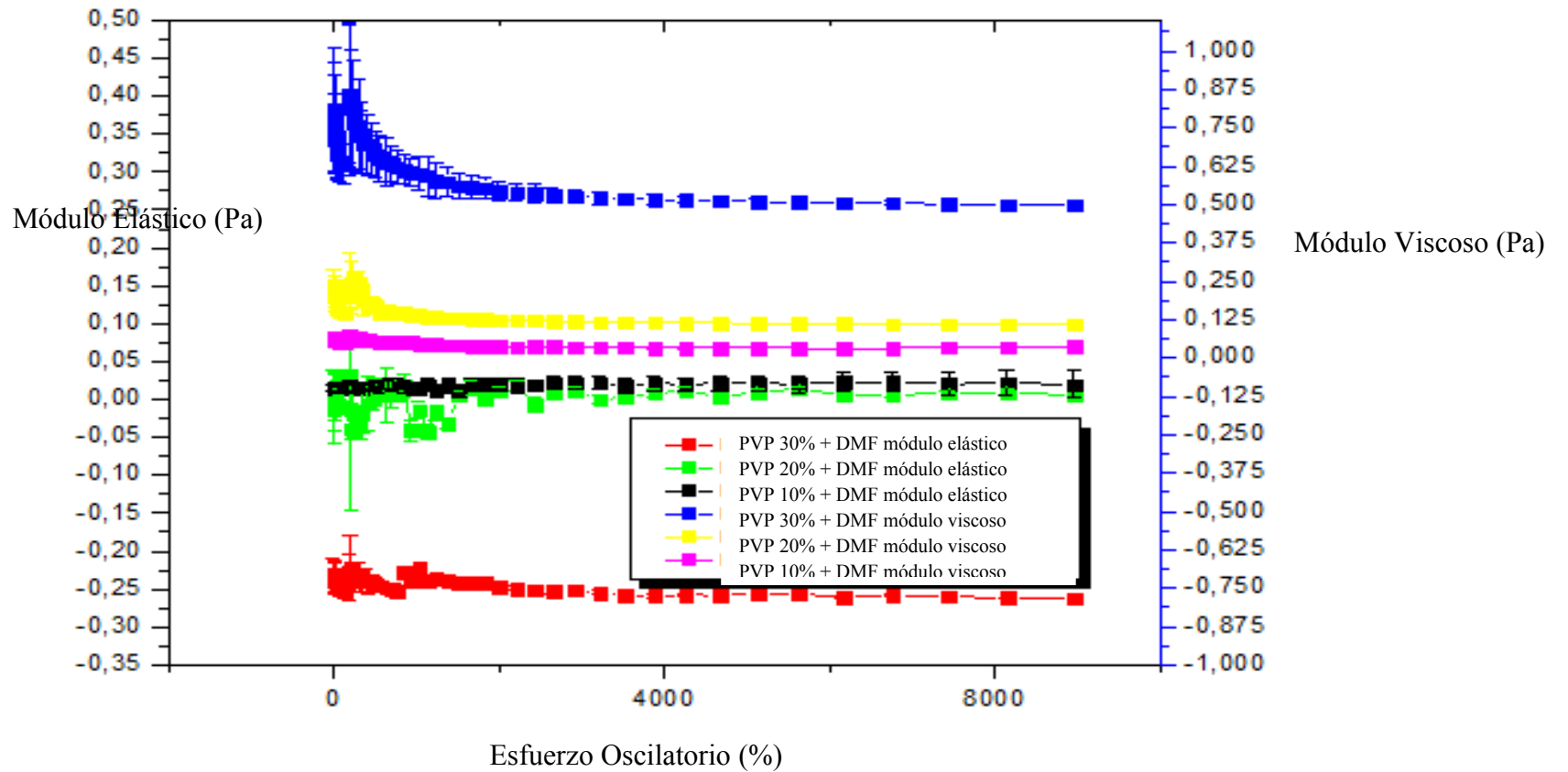


Figura 11. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en PVP + DMF

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en la solución de PVP + Etanol

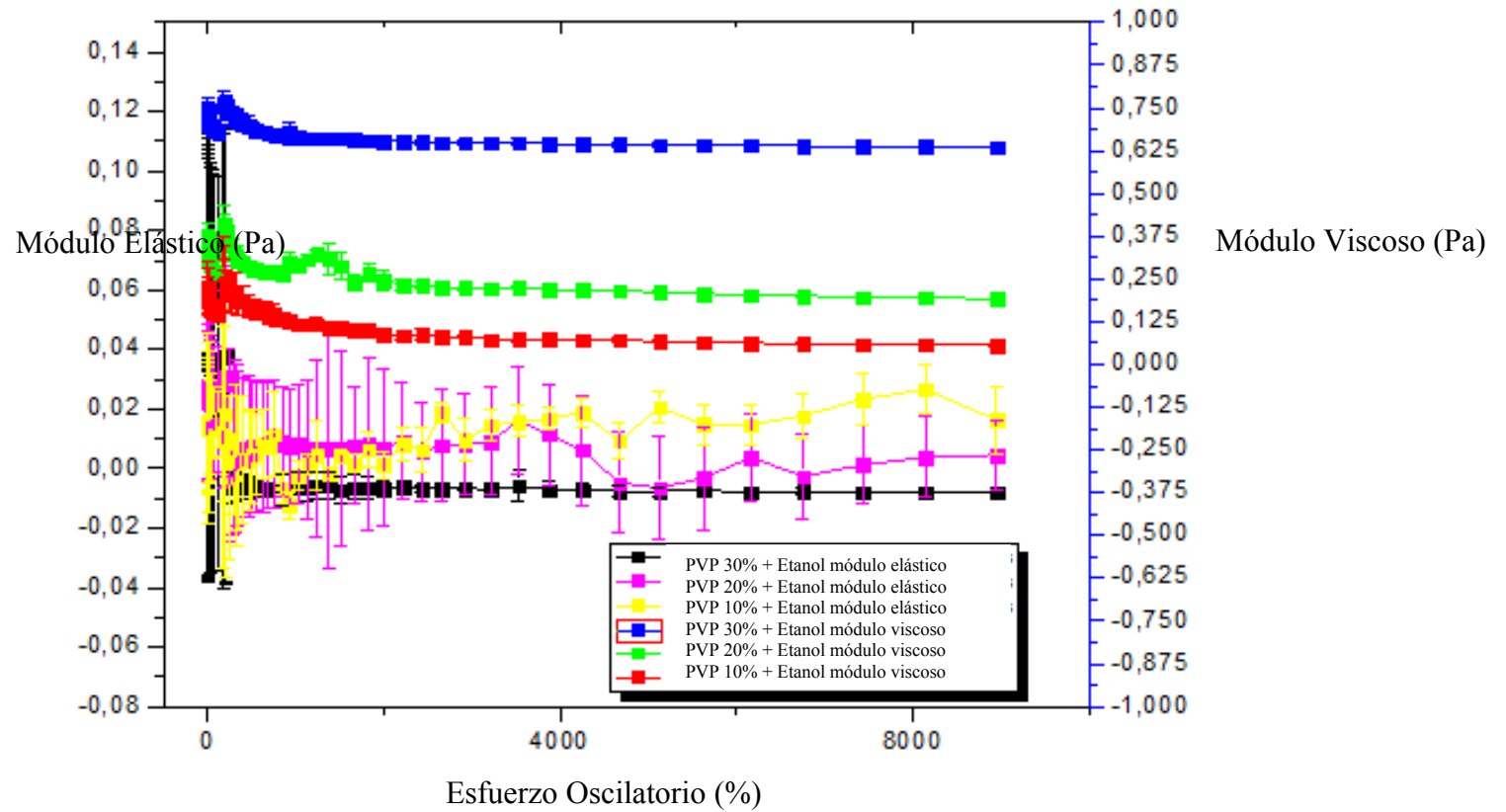


Figura 12. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 0 [V] en PVP + Etanol

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en la solución de PVP + DMF

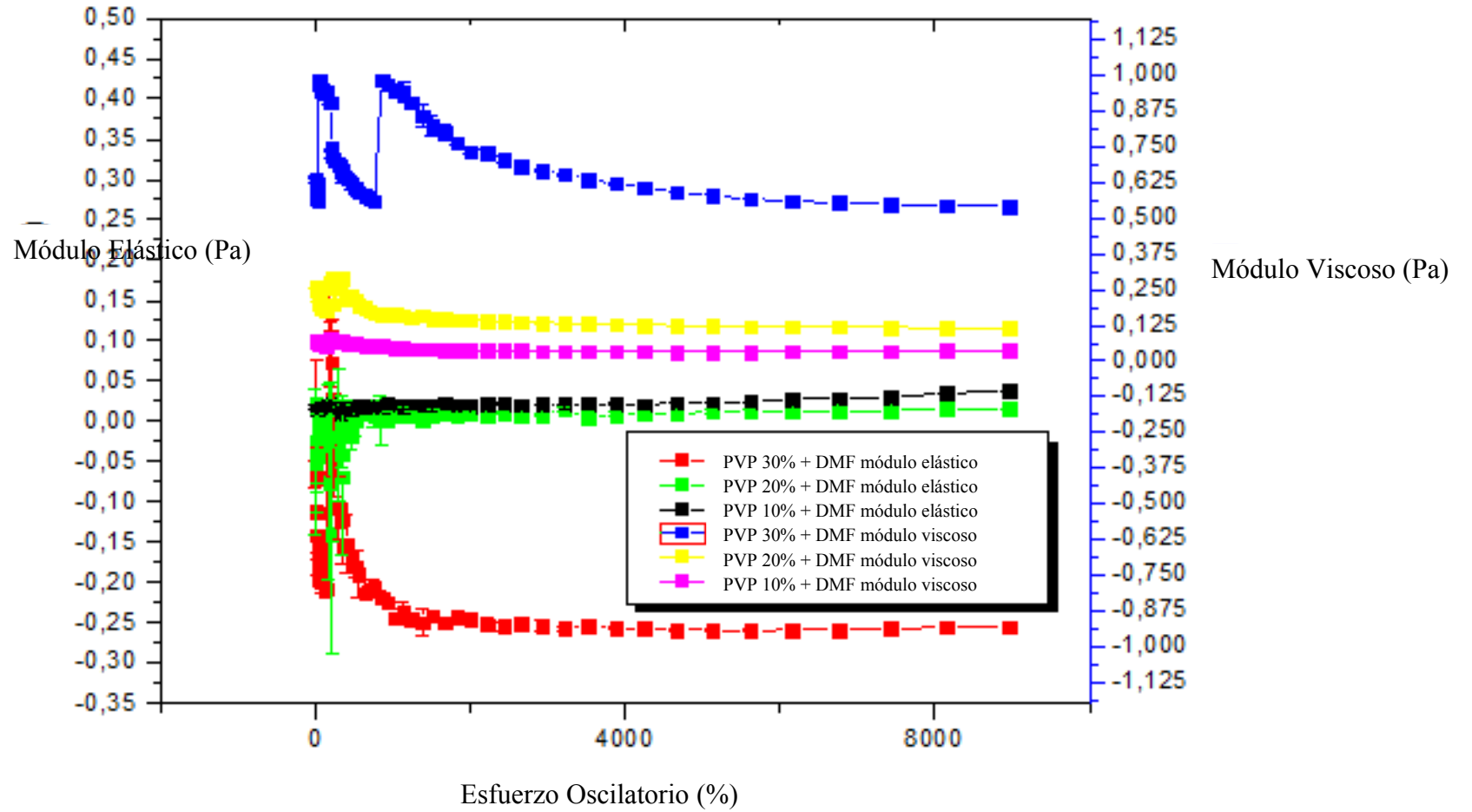


Figura 13. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en PVP + DMF

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en la solución de PVP + Etanol

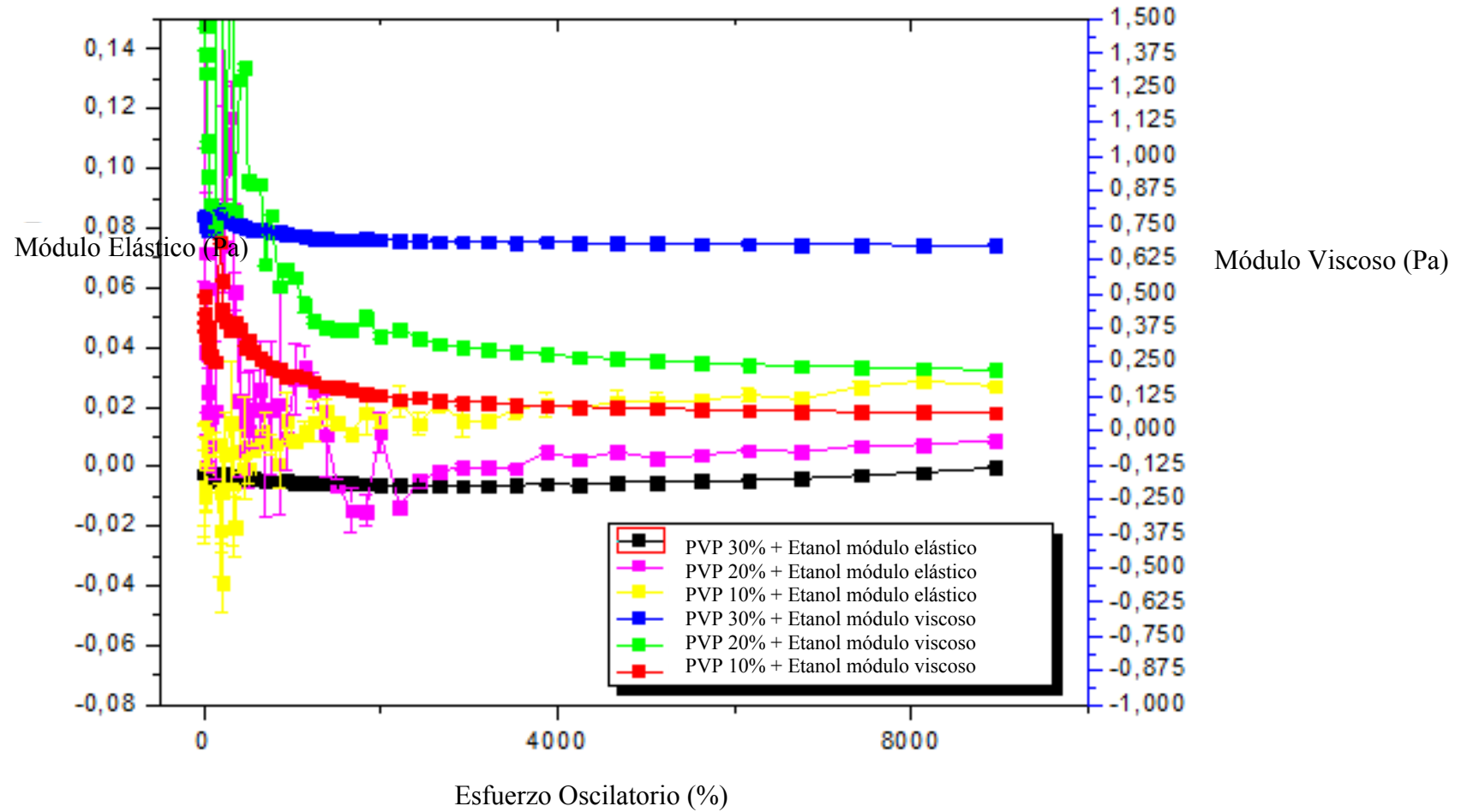


Figura 14. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 2000 [V] en PVP + Etanol

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en la solución de PVP + DMF

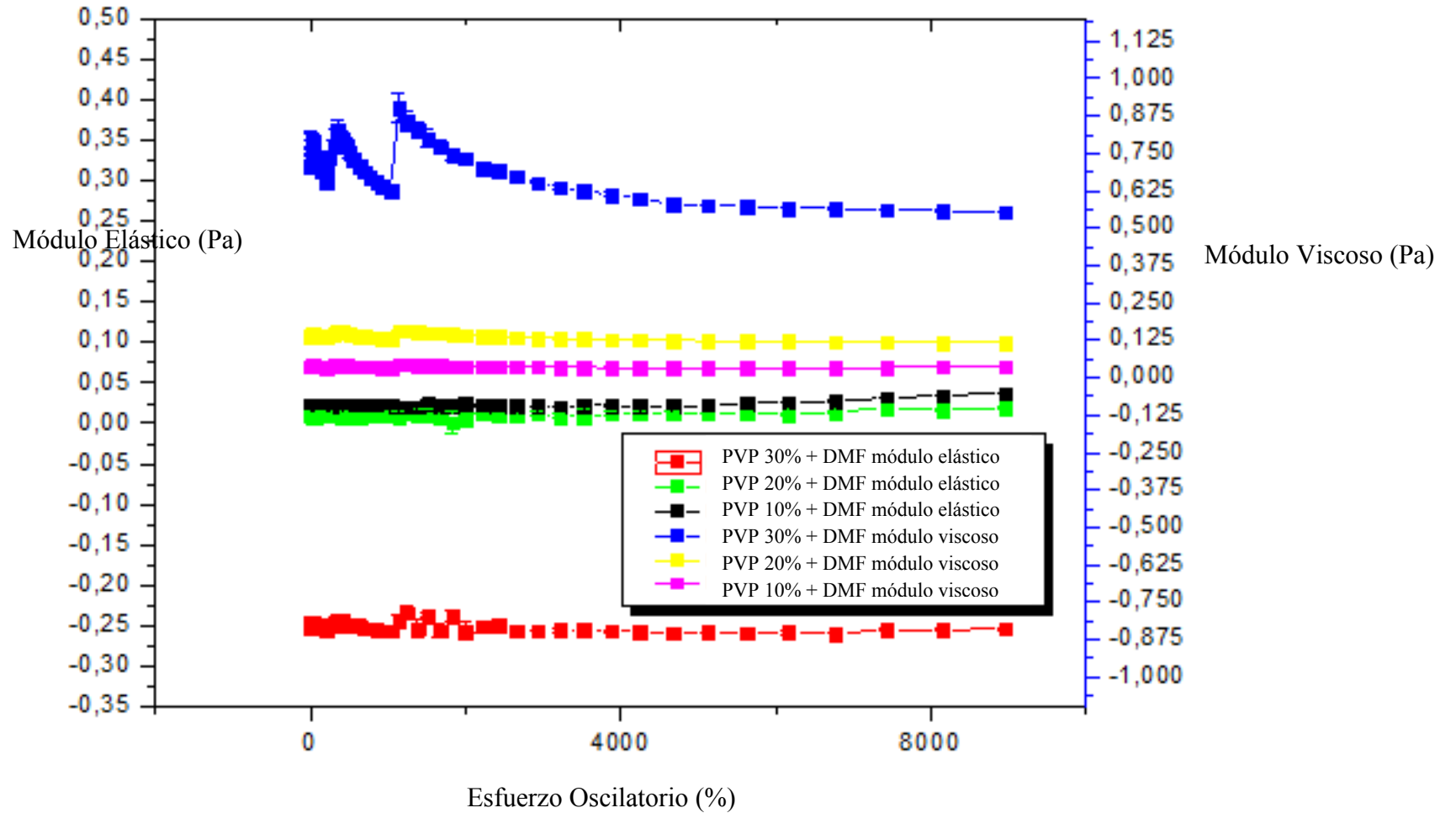


Figura 15. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en PVP + DMF

Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en la solución de PVP + Etanol

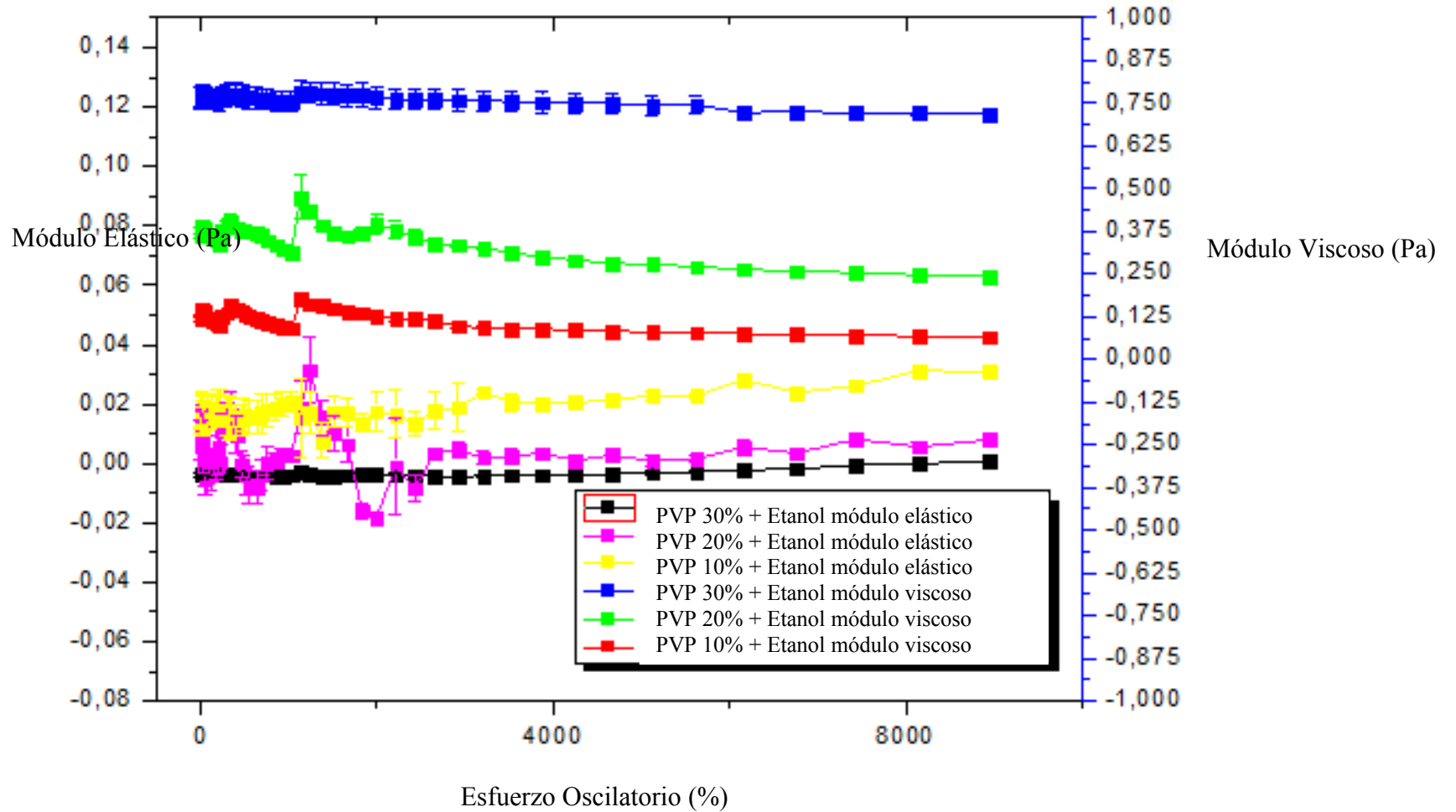


Figura 16. Efecto del campo eléctrico con un voltaje de 4000 [V] en PVP + Etanol

4.3. Análisis del Angulo de fase de la solución polimérica PVP+ DMF/Etanol

Como se estableció en la sección anterior a diferente calidad y concentración de solvente se espera mejores respuestas y comportamiento reológico; por tal razón se realizó el estudio de las soluciones poliméricas con concentraciones al 30%. En la Figura 17, se puede evidenciar que el ángulo de fase en bruto es elevado; por lo cual y según Instruments, [CITATION Cop05 \n \t \l 12298], en su manual de usuario al tener ángulos de 160° en adelante el instrumento posee una inercia elevada. Por lo tanto, se puede decir que esta inercia produce un efecto directo y negativo en el módulo elástico, el cual es conocido por ser el de almacenamiento, pero en este caso se ve superada su capacidad de absorción por la inercia que se almacena en el motor de rotación; existiendo una restructuración del comportamiento elástico de las soluciones. Esta es la razón para que se tenga valores cercanos a cero y negativos ya que, si se aplica una fuerza sinusoidal con el tiempo, se tiene valores de modulo viscosos positivos [CITATION Oba18 \l 12298], mientras que la parte elástica refleja resultados negativos. Chaplin, [CITATION Mar01 \n \t \l 12298], nos dice que se tiene módulos elásticos negativos y que a los resultados negativos y con tendencia a cero no son parte de su campo de estudio. Por tal motivo se ve reflejado de una forma clara los resultados de los efectos del campo eléctrico en el módulo viscoso.

Ángulo de fase en bruto de diferentes Concentraciones y diferentes Campos Eléctricos

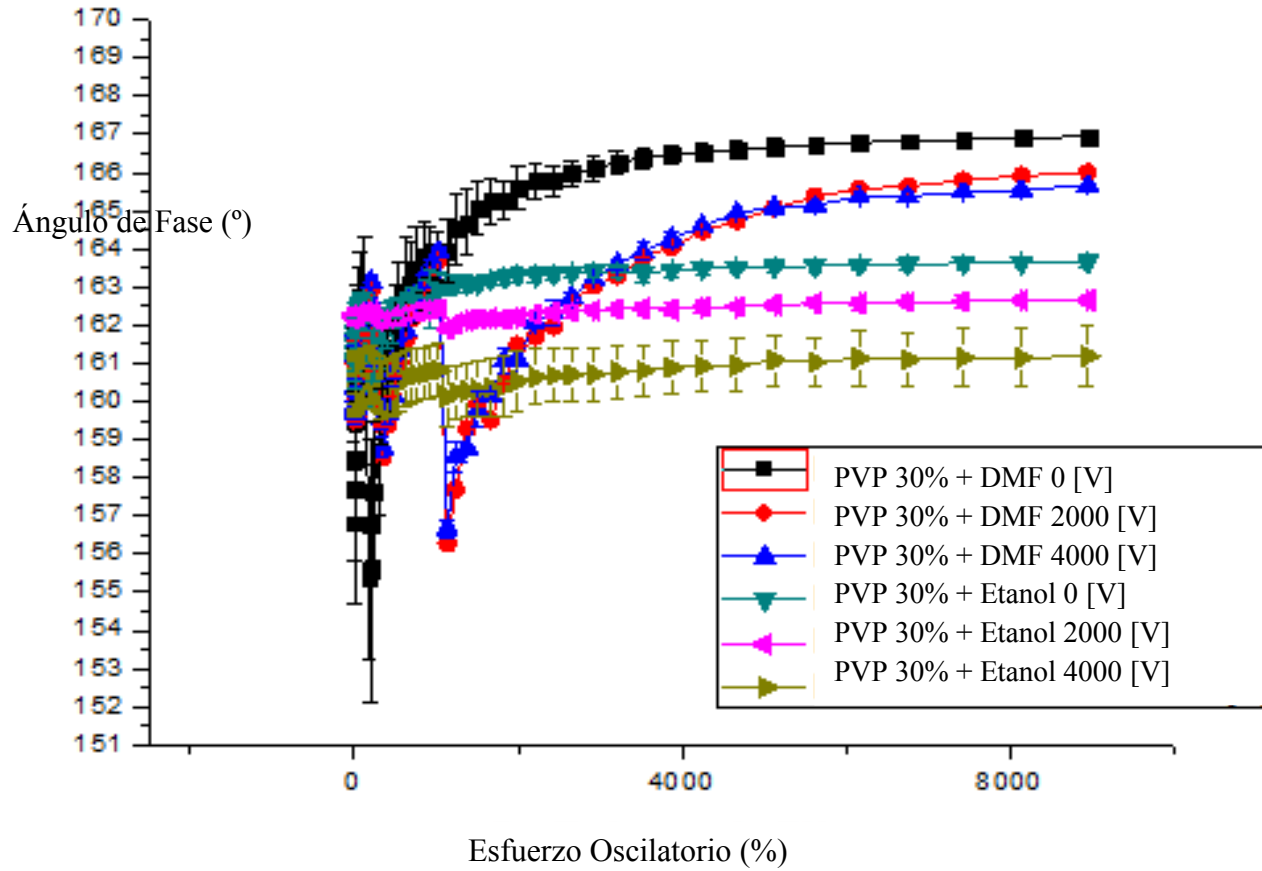


Figura 17. Angulo de fase en bruto a diferentes porcentajes de esfuerzo

4.4. Análisis de Módulo Viscoso de la solución polimérica PVP 30%+ DMF y PVP+Etanol

En el análisis de estas soluciones se realizó la Figura de módulo complejo tanto para PVP 30% + Etanol (ver Figura 18, 19 y 20) y para PVP 30 % + DMF (ver Figura 20, 21 y 22), con la finalidad de tener un panorama claro de como se ve influenciado la solución por el campo eléctrico.

En las ilustraciones 18 a la 21 se puede observar que existe un incremento notorio en las propiedades del módulo viscoso (loss modulus), cada vez que se expuso a un campo eléctrico mayor. Tomando en cuenta que para el disuelto en etanol tuvo mayor crecimiento que el DMF; lo cual corrobora los resultados obtenidos anteriormente y los expuesto por Peer, [CITATION Pee14 \n \t \l 12298], que el comportamiento reológico de las soluciones tiene relación directa con la calidad de solvente. En la tabla 4 se observa que las dos soluciones tienen un incremento de viscosidad, por otra parte, se puede concluir que ante este experimento la viscosidad de la solución disuelta en DMF ante el mayor campo eléctrico producido por el voltaje de 4000 [V], no alcanza la viscosidad de la disuelta en etanol a 0 [V]. Esto nos da un panorama claro de que la viscosidad es un parámetro fundamental en la formación de fibras y partículas.

Tabla 4
Viscosidad de las soluciones a diferentes voltajes

Voltaje [V]	PVP + Etanol 30%	Desviación	PVP + DMF 30%	Desviación
0	0,10202	0,00094	0,07849	0,00048
1000	0,10505	0,00145	0,09343	0,00012
2000	0,10844	0,00091	0,09505	0,00006
3000	0,11237	0,00134	0,09597	0,00036
4000	0,11865	0,00438	0,09685	0,00012

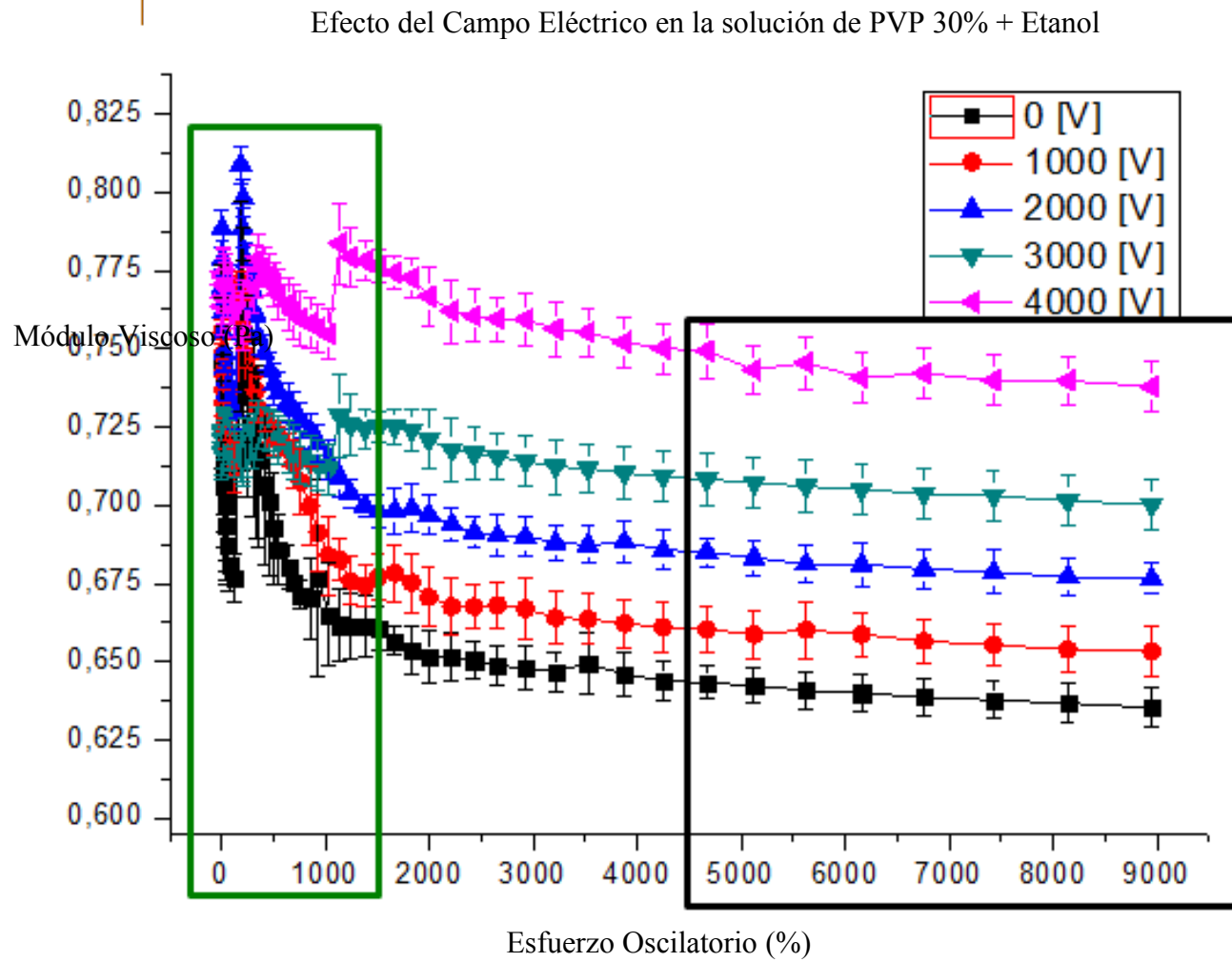


Figura 18. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 9000

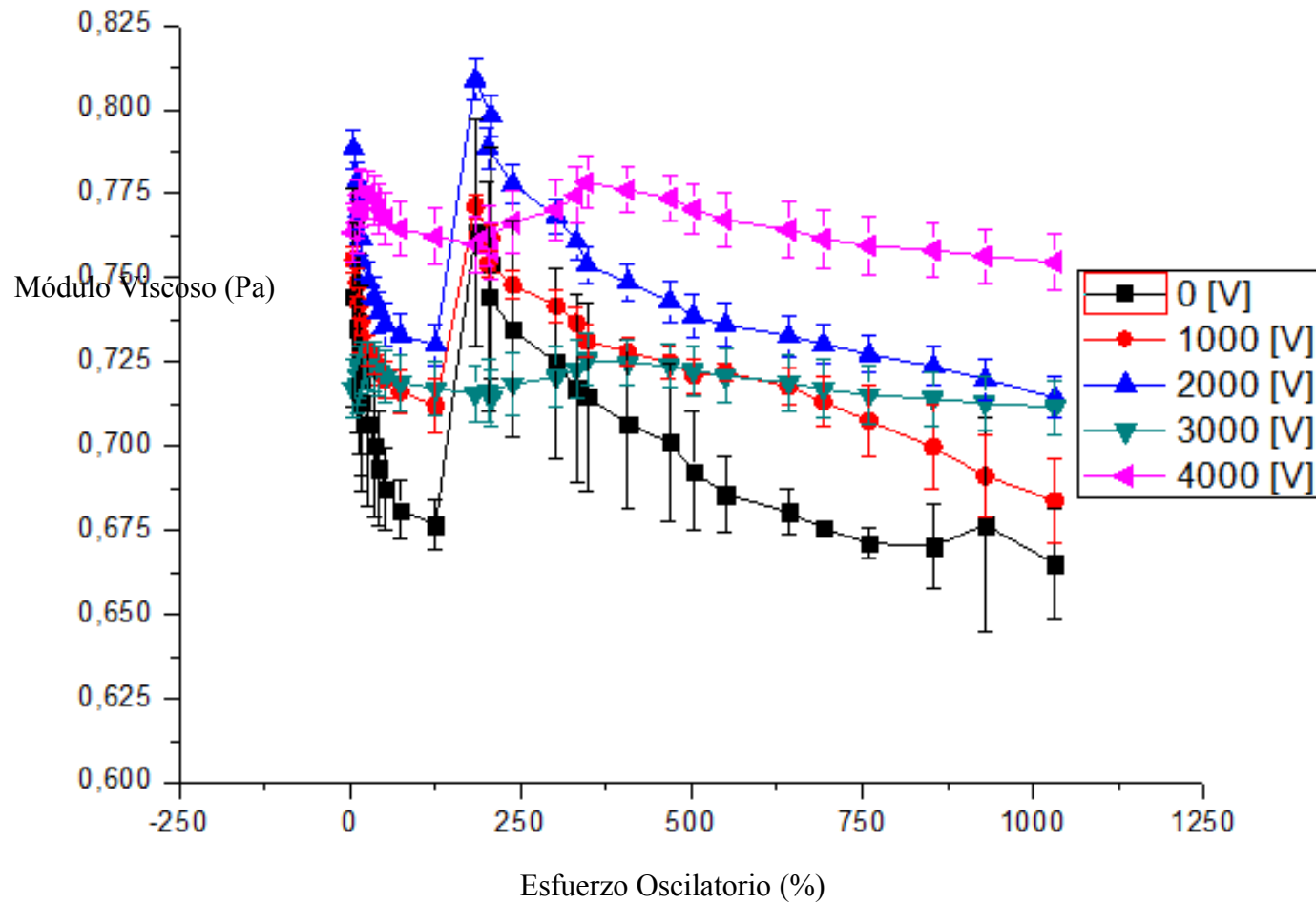


Figura 19. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 1000

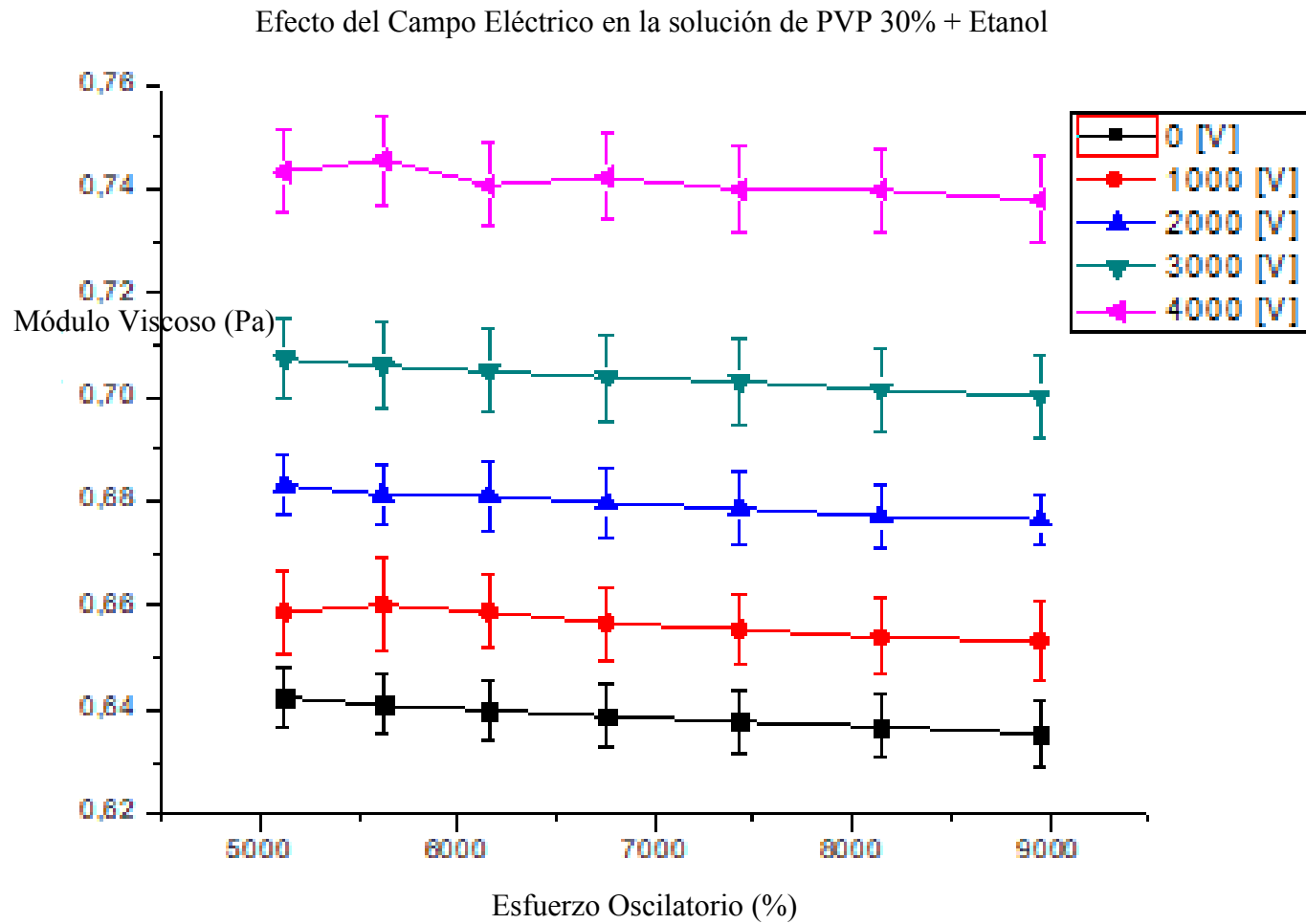


Figura 20. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + Etanol con un porcentaje de esfuerzo de 5000 a 9000

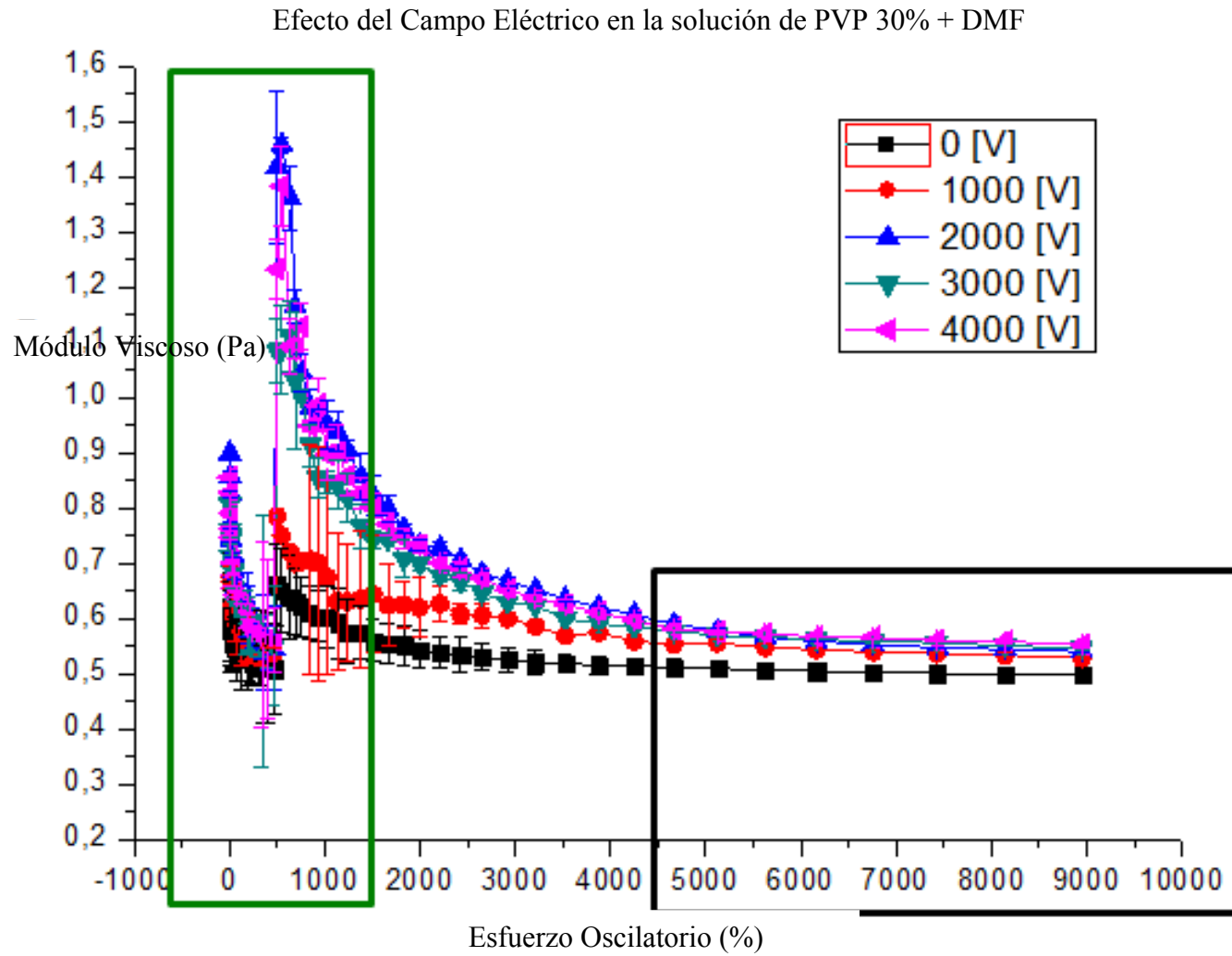


Figura 21. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 9000

Efecto del Campo Eléctrico en la solución de PVP 30% + DMF

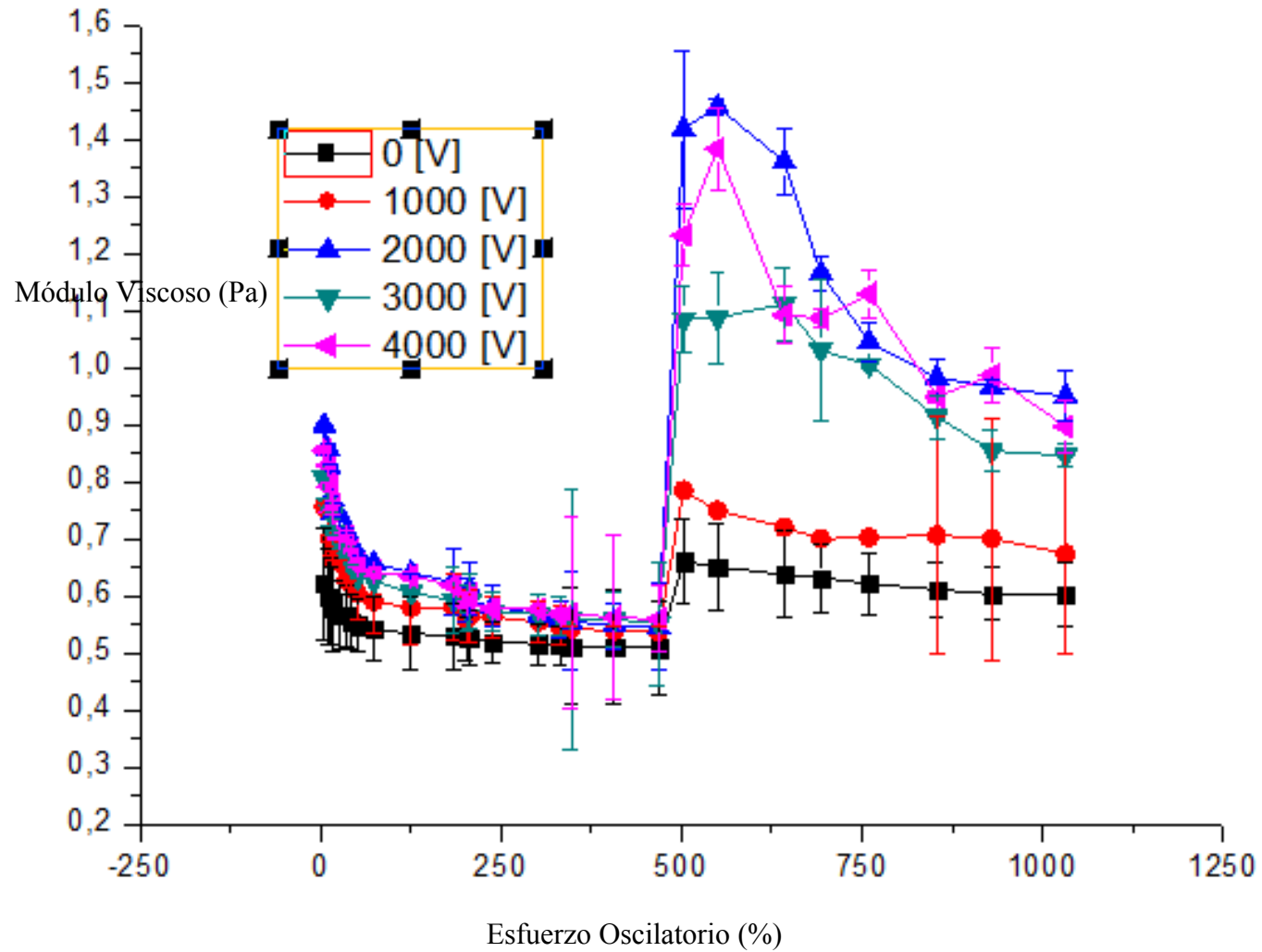


Figura 22. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 0 a 1250

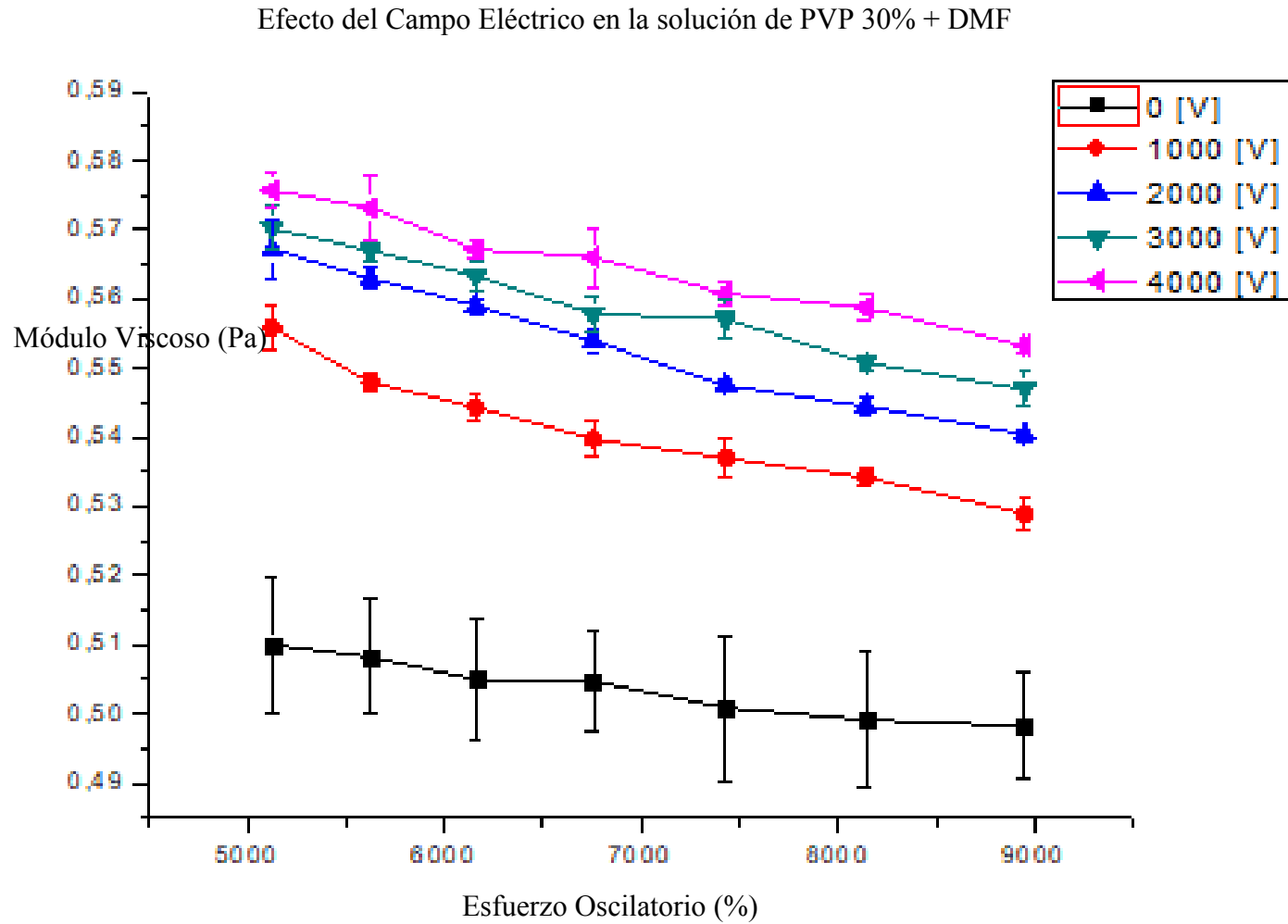


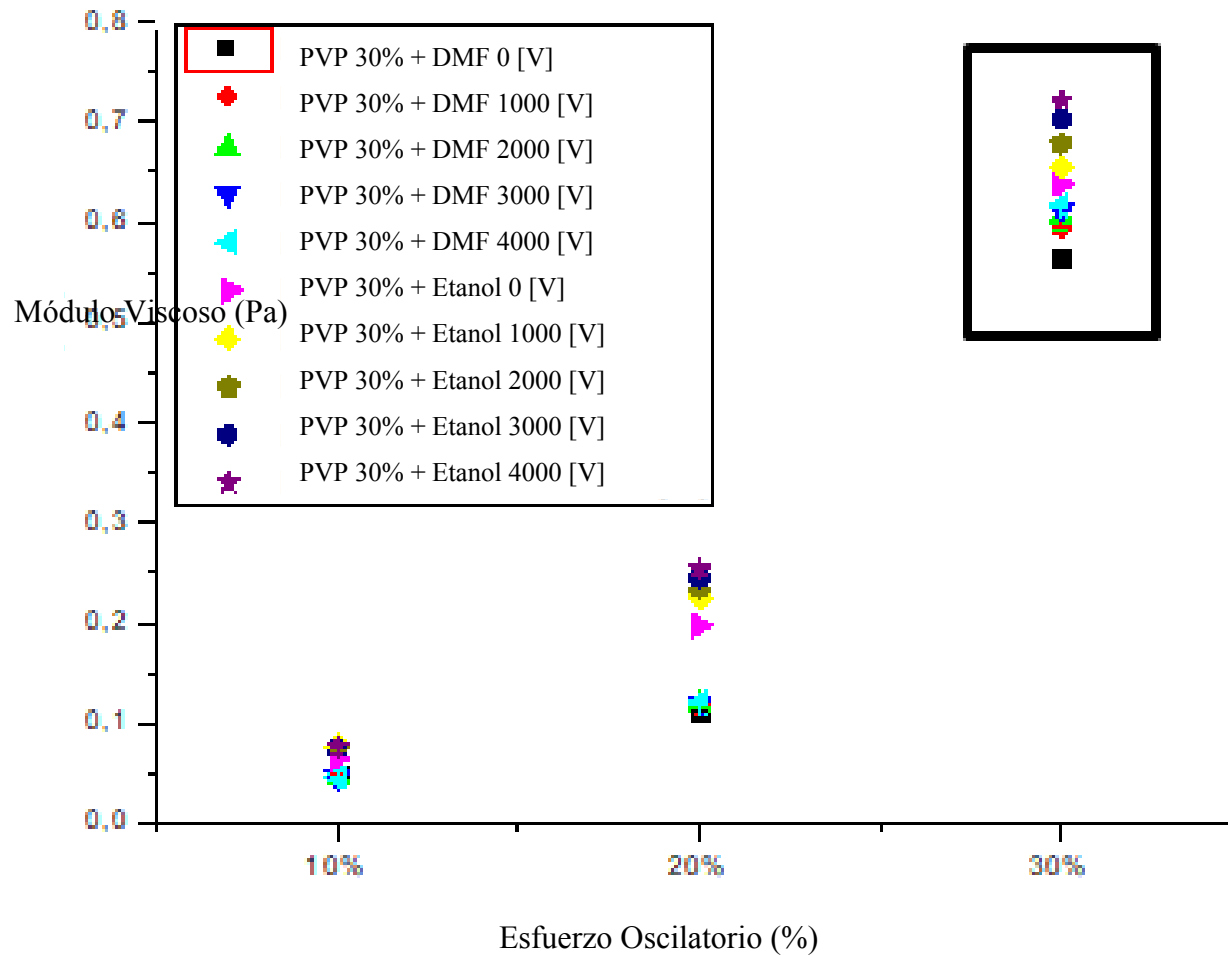
Figura 23. Efecto del campo eléctrico en el PVP 30% + DMF con un porcentaje de esfuerzo de 5000 a 9000

4.5. Análisis de Módulo Viscoso de la solución polimérica PVP disueltas en DMF y PVP+Etanol a diferentes concentraciones

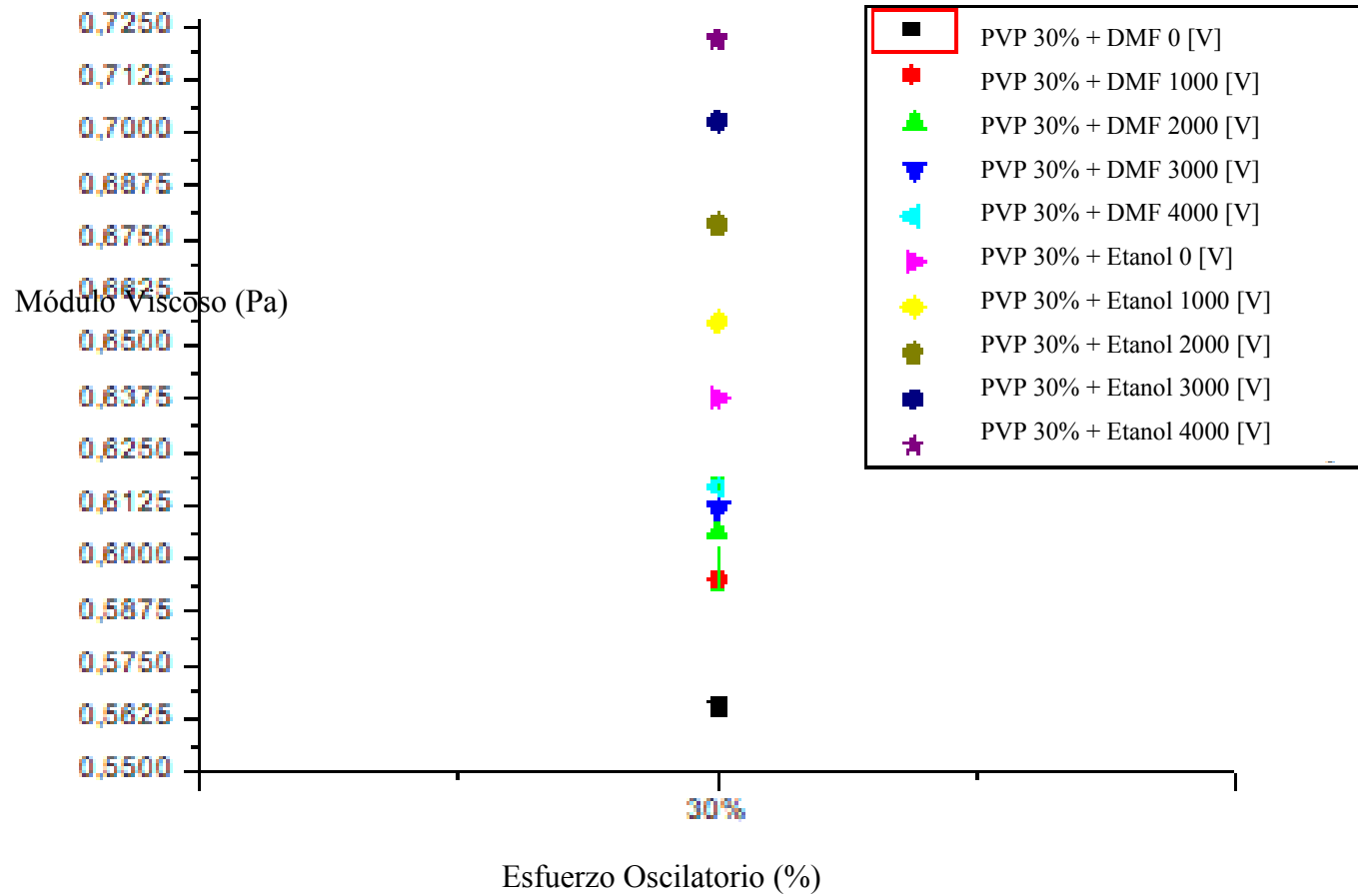
Se observa como varia el módulo viscoso (los modulus) en las ilustraciones 22 y 23 se puede observar de manera clara como aumenta el módulo viscoso (los modulus), pero en la actualidad no existen estudios sobre como varia el módulo viscoso al variar el campo eléctrico, se realizan investigaciones sobre el aumento de la temperatura, ya que existe la evaporación del disolvente y varia el módulo elástico, [CITATION Duq13 \l 12298]. Se obtiene un incremento de la parte elástica de las soluciones; lo cual es fundamental para la formación de fibras [CITATION Ant10 \l 12298].

Pero con esto se observa que se tiene el aumento considerable de la viscosidad y del módulo viscoso; generando cambios en la facilidad de fluir por lo cual se espera tener un mejor criterio al realizar predicciones en la variación de los parámetros para generar fibras y partículas.

Módulo viscoso en dependencia de la concentración de la solución

**Figura 24.** Módulo viscoso en función de la concentración de las soluciones

Módulo viscoso en dependencia de la concentración de la solución

**Figura 25.** Módulo viscoso en función de la concentración de 30 %

4.6. Análisis de las imágenes realizadas con la cámara de alta velocidad a las soluciones poliméricas de PVP + DMF y PVP+Etanol

En las ilustraciones 26 y 27 que son producto de variar el voltaje en el Electrospinning, se observa como varia el tamaño del menisco para la solución disuelta en etanol y DMF respectivamente.

Luego de los resultados obtenidos se puede ver en las ilustraciones 24 y 25 que al aplicar diferentes campos eléctricos existen cambios en la morfología de la estructura subatómica de la gota de la solución; sin embargo para nuestro campo de estudio que se abordó desde el momento que no se pudo analizar cómo influye el módulo elástico (storage modulus) y se estudió el módulo viscoso (loss modulus), no se puede evidenciar a profundidad dichos cambios en las fotografías; pero cabe resaltar que los cambios en el tamaño del menisco de la solución son considerables y que para el DMF que forma partículas el tamaño es mayor que para Etanol que forma fibras.

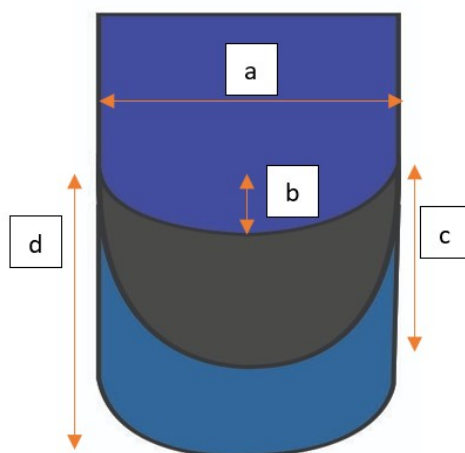


Figura 26. Foto de la cámara de alta velocidad de la

solución de PVP+Etanol a 0,2000 y 4000 V

- a) Diámetro de la aguja utilizada en el experimento 1.9 mm
- b) Menisco a 0 V con una medida de 0.56 mm
- c) Menisco a 2000 V con una medida de 1.67
- d) Menisco a 4000 V con una medida de 2.20

Figura 27

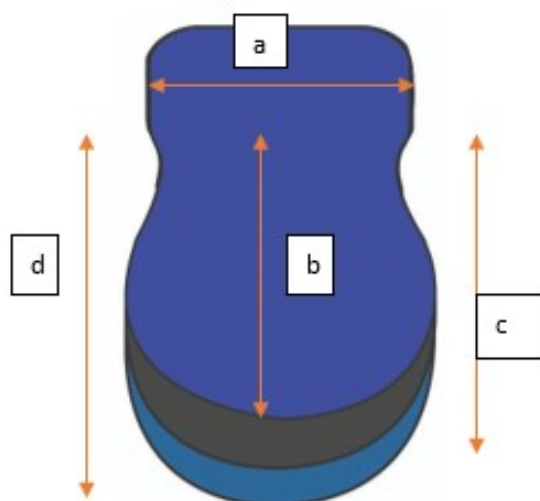


Figura 27. Foto de la cámara de alta velocidad de la solución de PVP+DMF a 0,2000 y 4000 V

- a) Diámetro de la aguja utilizada en el experimento 1.9 mm
- b) Menisco a 0 V con una medida de 1.70 mm
- c) Menisco a 2000 V con una medida de 2.15 mm

d) Menisco a 4000 V con una medida de 2.34 mm

4.7. Análisis de la simulación realizada en OpenFOAM, utilizando soluciones poliméricas de PVP + DMF y PVP +Etanol

En las ilustraciones 28 y 29, que es el producto de replicar las condiciones del Electrospinning aplicando los correspondientes voltajes de 0, 2000, 4000 [V], para de esta manera observar como varia el tamaño del menisco de la gota de las soluciones. Pero de igual manera que con las fotografías de la cámara de alta velocidad no se puede evidenciar a profundidad los cambios a nivel estructural pero los cambios en el tamaño del menisco de la solución son considerables y afirmamos lo que obtuvimos con la cámara de alta velocidad donde el DMF que forma partículas el tamaño del menisco es mayor que para Etanol que forma fibras.

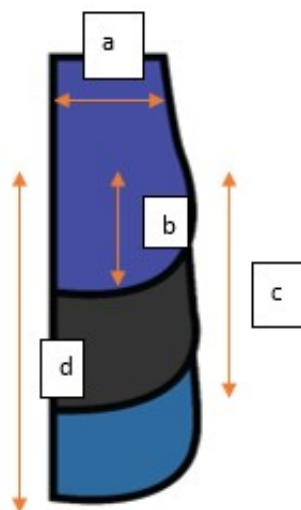


Figura 28. resultado de la simulación de la solución

PVP 30% + Etanol

- a) Diámetro de la aguja utilizada en el experimento 0.9 mm
- b) Menisco a 0 V con una medida de 0.75 mm
- c) Menisco a 2000 V con una medida de 1.46 mm
- d) Menisco a 4000 V con una medida de 2.15 mm

Figura 29

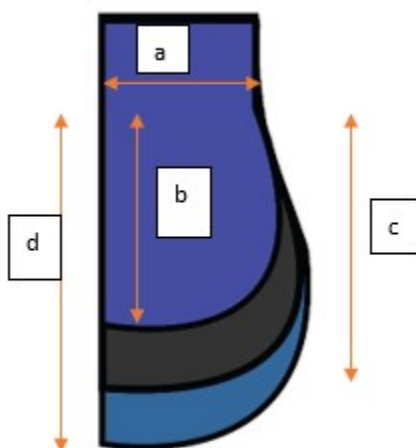


Figura 29. resultado de la simulación de la solución

PVP 30% +DMF

- a) Diámetro de la aguja utilizada en el experimento 0.9 mm
- b) Menisco a 0 V con una medida de 1.8 mm
- c) Menisco a 2000 V con una medida de 2.1 mm
- d) Menisco a 4000 V con una medida de 2.5 mm

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

5.1. Conclusiones:

Luego del presente trabajo de titulación previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico se tiene las siguientes conclusiones.

1. El presente trabajo de titulación se analizó el soluto de PVP disuelto en dos diferentes solutos; una disuelta en etanol y otra en DMF a las diferentes concentraciones de 10,20,30 por ciento, dando un total de seis soluciones estudiadas. Una vez desarrollado el ensayo reológico se encontró que se tiene una relación de corte de cizalla proporcional al esfuerzo que se le aplica; por tal motivo las seis soluciones tienen un comportamiento totalmente newtoniano. Por otra parte, La viscosidad obtenida en los ensayos de caracterización reológica, tiende a ser mayor a cantidades altas de solvente, teniendo el caso más significativo cuando son disueltas al 30%, en términos generales tenemos que la solución polimérica de PVP disuelta con etanol al 30 % tiene una viscosidad de 0,1026931 Pa.s y la disuelta en DMF al 30% su viscosidad es de 0,0782024 Pa.s.
2. Cuando observamos los efectos producidos por aplicar los campos eléctricos con los voltajes de 0, 1000, 2000, 3000 y 4000 V se obtuvo mediciones de modulo viscoso (loss modulus), el cual se incrementaban a mayor campo eléctrico, por otro lado se obtuvo mediciones de modulo elástico (storage modulus) cercanos a cero, por tal motivo se realizó un análisis de inercia, en el cual obtuvimos un ángulo de fase en bruto mayor a

160; esto indica que se superó la capacidad de absorción de la solución, por la inercia que se almacena en el motor de rotación. Es decir, el fluido su componente elástica es muy baja y no se puede medir. No obstante cabe recalcar que se obtuvo mediciones de modulo viscoso significativos para nuestro análisis donde a mayor campo eléctrico y solvente se tiene un valor superior de viscosidad, en definitiva las soluciones expuestas a 4000 V disuelta en etanol al 30 % tiene una viscosidad de 0,11865 Pa.s y la disuelta en DMF al 30 % 0,09685 Pa.s; es importante recalcar que la solución disuelta en DMF y expuesta a 4000 V no supera la viscosidad de la solución disuelta en etanol y expuesta a 0 V.

3. Para nuestro trabajo de investigación no fue suficiente el análisis del módulo viscoso (loss modulus) puesto que no se puede tener una predicción de la forma que tendrá el menisco, ya que no se sabe cómo estará formada la estructura interna de la gota, el cual tiene relación con el módulo elástico (storage modulus), pero por los datos recolectados, las fotos de la cámara de alta velocidad y la comparación con la simulación se tiene una gota más compacta y rígida para la disuelta en etanol, mientras que para la solución DMF se tendrá una gota que fluirá fácilmente. Por tal motivo se puede concluir que si fluye con facilidad se forma partículas y si no fluye con facilidad se forman fibras

5.2. Recomendaciones:

Luego de finalizar nuestro trabajo de investigación se recomienda lo siguiente

1. Al momento que se realiza la investigación asegurarnos que exista repetibilidad experimental, con lo cual nos aseguramos que los datos obtenidos y posteriormente estudiados no son erróneos.
2. Al realizar estudios de temas similares, hacerla en base a documentación confiable, puesto que, al ser un tema relativamente no explorado e investigado, se tiene información escasa y en muchos de los casos que no contribuyen con la investigación ya que su sustento no tiene una base sólida que los respalde.
3. Realizar una investigación de este tema con soluciones que tengan una inercia mayor a la del instrumento y valores de modulo viscoso elevado, para que de esta manera se tenga un rango mayor de información.

Bibliografía

Arias , J., Tonguino, C., & Mariana, Y. (2018). Diseño y construcción de un equipo para la producción de microfibras a través de la técnica de Melt Electrospinning mediante un extrusor de husillo. Quito, Pichincha, Ecuador.

Barnes, H., Hutton, J., & Walters, K. (1998). An Introduction to Rheology. En *Rheology Series Vol. 3*. Elsevier, Amsterdam.

Billmeyer, F. (1978). *Ciencia de los Polímeros* . España: Reverte.

Carrillo Sánchez, J. M., & Castillo Elsitdié, L. G. (2011). Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional. *researchgate*, 1-3.

Chaplin, M. (2001). *London South Bank University*. Obtenido de <http://www1.lsbu.ac.uk>

Diaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos 2a Ed.* .

Duque Sánchez, L. M., Rodríguez, L., & Marcos, L. (2013). Electrospinning: La era de las Nanofibras. *Iberoamericana de Polímeros*, 10-27.

experimentossencillos. (2010). *experimentossencillos*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/experimentossencillos/materia/-que-es-el-menisco-de-un-liquido>

Fong, C. S., Black, N., & Kiefer, P. (2007). An experiment on the Rayleigh instability of charged.

Fox, R. W. (1995). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.

García Alija, S. (1995). *Electrohydrodynamic spraying for the production of metal powder*.

García Sánchez, J. (2012). Estudio Reológico de Dispersiones de Líquido iónico con Nanotubos de Carbono. Cartagena.

Garoz Gomez, D. (2010). *Flujos con superficies libres*. Madrid.

Ginder, D. (1995). *Progress in Electrorheology*. New York: Plenum Press.

Gomez, D. (2010). *Flujo con superficies libres. Electrospray y generacion de burbujas*. Madrid.

Gracia Fernández, C. A. (2017). Utilización de métodos reológicos no lineales. *Tese de Doutoramento*.

Instruments, C. T. (2005). *Understanding Instrument*.

Levenspiel, O. (1993). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. España: Reverté.

Lopez García, O., & Carnicero, A. (2003). Materiales inteligentes I/II: introducción a los materiales del siglo XXI. *researchgate*, 40-46.

Lopez Vazquez, L. (2012). Temas de Fisica. Club Universitario.

Melero Columbrí, F. J. (1993). *Materiales y Procesos Avanzados*.

Miravete de Marco, A. (1994). *Antonio Miravete de Marco*. Zaragoza: Reverté.

Monar, G., & Redroban, L. (2017). Obtención de micropartículas de Polivinilporrolidona (PVP) a través de la técnica de Electrospray. Quito, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Nieto, C., Mejia Alvarez, R., & Agudelo Santamaria, J. R. (2004). Dinamica de Fluidos Computacional Aplicada.

Obada, D., Kuburi, L., Dauda, M., & Umaru, S. (2018). Effect of variation in frequencies on the viscoelastic properties of coir and coconut husk powder reinforced polymer composites.

Paar, A. (2010). *Rheology, principles, measurements, and applications*. .

Peer, P. S. (2014). n electrorheological investigation of PVB solutions in connection with their electrospinning qualities. *Polymer Testing*, 115-121.

Rayleigh, L. (1882). On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science., 184-186.

Rejón, L., López, F., Montoya, G., & Manero, O. (2003). Fluidos electroreológicos. *Boletín IIE*, 26-30.

Rubio, G., & Marin, J. (2001). *Introducción al Diseño de Experimentos*. Antoni Bosch.

Sandoval, W., & Castillo, P. (2016). Diseño y construcción de un equipo de sondeo eléctrico vertical para estudios de estructuras permeables. Quito, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

SN. (2007). Densidad, Viscosidad y Tensión Superficial. En *Ensayos Físico-Químico* (págs. 65-70).

Steffe, J. (1992). *Rheological Methods in food process engineering 2a ed.* USA: Freeman Press.

Streeter, V. L. (1970). *Mecánica de los Fluidos*. México: Libros McGraw-Hill de México.

Tabares, I., Vettorel, S., & Oliva, A. (2015). *Física IV Electrostatica*. Rosario.

Taylor, G. (1964). Disintegration of water drops in an electric field. Londres: Proc. Roy. Soc. London Ser. A Math. Phys. Sci.

Tello, F. (2011). <http://mecanicadefluidosft.blogspot.com/2011/09/comportamiento-reologico-de-las.html>. Obtenido de Introducción a la Mecánica Fluidos: <http://mecanicadefluidosft.blogspot.com/>

Tipler, P. A. (1992). *Física Pruniversitaria*. Reverte.

Torres, M., Pedroza, Rodríguez, & Colin. (2013). Crecimiento y caracterización de nanofibras obtenidas a partir de proteína aislada de suero lácteo y óxido de polietileno por la técnica de electrohilado. *SciELO*.

Wiley, P., & Stutzman, W. (1978). A simple experiment to demonstrate Coulomb's law. *Am. J. Phys.*

Yuse Llnadres, M. (2007). Taller y laboratorio: Experimento casero: Péndulo de torsión. Medida de fuerzas pequeñas. *Revista 100cias@ uned 10*, 121-125.

Zarrabi, A., & Vossoughi, M. (2009). Elestrospray: Novel Fabrication Method For Biodegradable Polymeric Nanoparticles For Further Applicatios h Drug Delivery Systems_ NANOCOM. .

Zeleny, J. (1914). The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces. *Physical Review*, 69.