



PROTOCOLO COMPLETO: SÍNTESIS, FORMULACIÓN Y APLICACIÓN

Nanopartículas de Cobre en Polímero PVA para Tintas Conductivas

Versión: 1.0

Fecha: Mayo 2026

Clasificación: Protocolo Técnico Experimental

TABLA DE CONTENIDOS

- 1 Introducción y Principios Teóricos
 - 2 Materiales y Reactivos Requeridos
 - 3 Equipamiento Necesario
 - 4 Protocolo de Síntesis de Nanopartículas de Cobre
 - 5 Protocolo de Formulación de Tinta Conductiva (PVA)
 - 6 Protocolo de Aplicación y Sinterización
 - 7 Caracterización y Evaluación
 - 8 Precauciones de Seguridad
 - 9 Troubleshooting (Solución de Problemas)
-

1. INTRODUCCIÓN Y PRINCIPIOS TEÓRICOS

1.1 Fundamentos de Nanopartículas de Cobre

¿Por qué cobre?

- Conductividad eléctrica: 5.96×10^7 S/m (excelente)
- Costo: 10-20 veces menor que plata
- Punto de fusión bajo: 1,085°C (facilita sinterización)
- Disponibilidad: Abundante en Chile y Argentina

Desafío principal: Oxidación

- El cobre se oxida rápidamente en aire: $\text{Cu} \rightarrow \text{CuO}$ (resistividad aumenta 10^6 veces)
- Solución: Usar polímeros protectores (PVA, PVP) como agentes estabilizadores

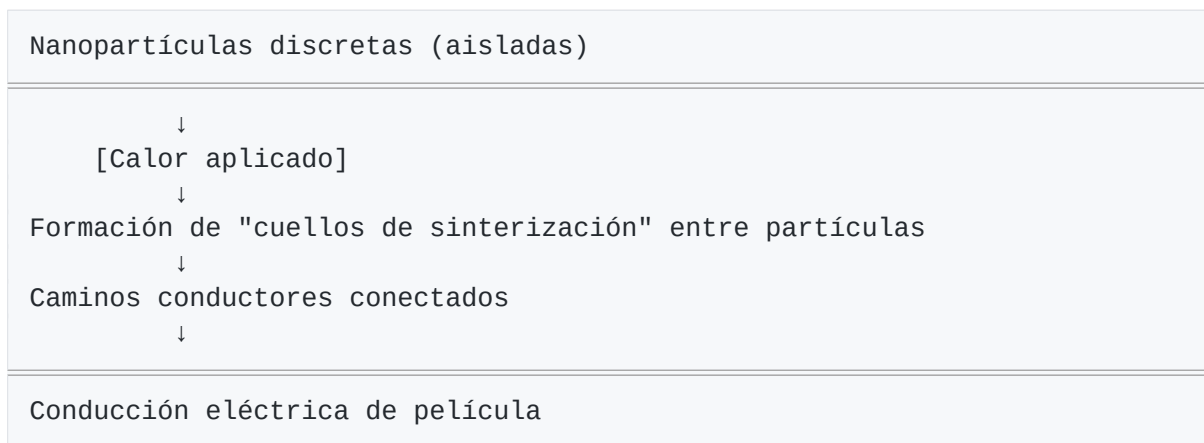
1.2 Rol del Polímero PVA

Polivinilalcohol (PVA):

- Fórmula: $[\text{C}_2\text{H}_4\text{O}]_n$
- Peso molecular: 10,000-100,000 g/mol (usar 10,000-30,000 para tintas)
- Función: Estabilizador coloidal, protección contra oxidación, mejora de adhesión
- Ventaja: Soluble en agua, biodegradable, bajo costo
- Grado recomendado: PVA 87-89% hidrolizado, Mw 10,000-20,000

1.3 Mecanismo de Sinterización

Proceso de conducción eléctrica:



Temperaturas críticas:

- **125-150°C:** Remoción de polímero protector
 - **200-250°C:** Inicio de sinterización (formación de cuellos)
 - **250-300°C:** Sinterización óptima (máxima conductividad)
 - **> 300°C:** Riesgo de degradación de sustrato
-

2. MATERIALES Y REACTIVOS REQUERIDOS

2.1 Reactivos para Síntesis de Nanopartículas

Reactivo	Fórmula	Cantidad	Proveedor	Pureza
Sulfato de cobre pentahidratado	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	10 g	Químico estándar	$\geq 99\%$
Ácido ascórbico	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$	5 g	Farmacéutico	$\geq 99\%$
Polivinilpirrolidona K30	$(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$	5 g	Químico estándar	$\geq 99\%$
Etilenglicol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	100 mL	Químico estándar	$\geq 99.5\%$
Etanol absoluto	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	200 mL	Químico estándar	$\geq 99.8\%$
Agua destilada	H_2O	200 mL	Laboratorio	Destilada

2.2 Reactivos para Formulación de Tinta (PVA)

Reactivo	Cantidad	Función	Proveedor
Nanopartículas de Cu (sintetizadas)	20 g	Fase conductora	Síntesis propia
Polivinilalcohol (PVA)	10 g	Estabilizador/adhesivo	Químico estándar
Agua destilada	70 mL	Solvente	Laboratorio
Glicerol (opcional)	5 mL	Plastificante	Químico estándar
Etanol (opcional)	5 mL	Disolvente adicional	Químico estándar

2.3 Sustratos para Deposición

Sustrato	Especificación	Función
Vidrio	Portaobjetos estándar (25×75 mm)	Referencia (no flexible)
Papel	Papel bond blanco, 80 g/m ²	Aplicación práctica
Poliimida (Kapton)	50-125 μm espesor	Flexible de alta T°
Poliéster (PET)	100-200 μm espesor	Flexible económico

3. EQUIPAMIENTO NECESARIO

3.1 Equipamiento Crítico

Equipo	Especificación	Función
Baño de aceite	Rango 25-300°C	Mantener temperatura de síntesis
Agitador magnético	Velocidad 0-1500 rpm	Mezcla homogénea
Termómetro	Rango -10 a 110°C	Monitoreo de temperatura
Centrifugadora	9,000 rpm mínimo	Separación de nanopartículas
Horno de secado	Vacío, 40-150°C	Secado de muestras
Placa calefactora	Rango 25-300°C	Sinterización de películas
Multímetro digital	Rango 0-200 Ω	Medición de resistencia

3.2 Equipamiento Complementario

Equipo	Función
Sonicador ultrasónico	Dispersión de nanopartículas
Microscopio óptico	Inspección visual de películas
Balanza analítica	Pesaje de reactivos (precisión ± 0.001 g)
Pipetas graduadas	Medición de volúmenes
Vasos de precipitado	Mezcla de reactivos
Varillas de vidrio	Agitación manual
Filtros de papel	Filtración de soluciones
Tubos de ensayo	Almacenamiento temporal

3.3 Equipo de Protección Personal (EPP)

- Bata de laboratorio
- Guantes de nitrilo (dobles)
- Gafas de seguridad
- Mascarilla N95 (para polvos nanométricos)
- Zapatos cerrados

4. PROTOCOLO DE SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE

4.1 Preparación Previa

Tiempo: 15 minutos

10 Calibración de equipos:

- Verificar termómetro en agua hirviendo (debe marcar 100°C)
- Calibrar balanza analítica con pesa de referencia
- Verificar funcionamiento del agitador magnético

11 Preparación del área de trabajo:

- Limpiar superficie con etanol
- Disponer todos los reactivos en orden
- Verificar disponibilidad de agua destilada

12 Preparación del baño de aceite:

- Llenar baño con aceite mineral hasta 2/3 de capacidad
- Encender baño y establecer temperatura a 150°C
- Esperar 10 minutos para estabilización

4.2 Preparación de Soluciones Precursoras

Tiempo: 30 minutos

Paso 1: Solución Precursora de Cobre

Objetivo: Preparar fuente de Cu^{2+}

Procedimiento:

- 13 Pesar 10 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en balanza analítica
- 14 Verter en vaso de precipitado de 250 mL
- 15 Agregar 50 mL de etilenglicol
- 16 Agitar magnéticamente a 500 rpm durante 5 minutos
- 17 **Resultado:** Solución azul clara (concentración 0.1 M)

Verificación:

- Color: Azul intenso
- Transparencia: Completa (sin precipitados)
- pH: No medir (etilenglicol no es acuoso)

Paso 2: Solución Precursora de Reductor

Objetivo: Preparar agente reductor

Procedimiento:

- 18 Pesar 5 g de ácido ascórbico
- 19 Verter en vaso de precipitado de 250 mL
- 20 Agregar 50 mL de etilenglicol



- 21 Agitar magnéticamente a 500 rpm durante 5 minutos
- 22 **Resultado:** Solución amarilla clara (concentración 0.2 M)

Verificación:

- Color: Amarillo pálido
- Transparencia: Completa
- Olor: Característico de ácido ascórbico (débil)

Paso 3: Solución Precursora de Estabilizador (PVP)

Objetivo: Preparar agente protector de nanopartículas

Procedimiento:

- 23 Pesar 5 g de PVP K30
- 24 Verter en vaso de precipitado de 250 mL
- 25 Agregar 50 mL de etilenglicol
- 26 **IMPORTANTE:** Calentar a 150°C en baño de aceite con agitación vigorosa (800 rpm)
- 27 Mantener a 150°C durante 10 minutos hasta disolución completa
- 28 **Resultado:** Solución transparente incolora

Verificación:

- Transparencia: Completa (sin partículas visibles)
- Viscosidad: Mayor que etilenglicol puro
- Temperatura: Debe estar a 150°C

4.3 Síntesis de Nanopartículas (Reacción Principal)

Tiempo: 150 minutos (2.5 horas)

Procedimiento:

- 29 **Preparación del reactor:**
 - Mantener solución de PVP a 150°C en baño de aceite
 - Verificar que agitador magnético funcione a 800 rpm
 - Colocar termómetro en solución
- 30 **Adición de precursores (CRÍTICO):**
 - Conectar jeringa de 10 mL a aguja de calibre 25
 - Llenar jeringa con solución de CuSO₄ (paso 1)
 - Agregar a solución de PVP a razón de **1 mL/min**
 - Tiempo total para 50 mL: 50 minutos

- **Nota:** Velocidad lenta es crítica para control de tamaño

31 Adición de reductor:

- Después de completar adición de CuSO_4
- Llenar nueva jeringa con solución de ácido ascórbico
- Agregar a razón de **1 mL/min**
- Tiempo total para 50 mL: 50 minutos

32 Observaciones durante reacción:

- **0-30 min:** Solución permanece azul (Cu^{2+} sin reducir)
- **30-60 min:** Cambio gradual a rojo-marrón (formación de Cu^0)
- **60-120 min:** Color rojo oscuro estable (nanopartículas formadas)
- **120-150 min:** Mantener a 150°C con agitación

33 Finalización de síntesis:

- Apagar baño de aceite
- Permitir enfriamiento natural a temperatura ambiente
- **Tiempo de enfriamiento:** 30-60 minutos
- **NO acelerar enfriamiento** (riesgo de aglomeración)

4.4 Purificación de Nanopartículas

Tiempo: 60 minutos

Procedimiento:

34 Transferencia:

- Verter solución rojo-oscuro en tubo de centrifugación de 50 mL
- Usar pipeta para transferencia cuidadosa

35 Primer ciclo de centrifugación:

- Centrifugar a 9,000 rpm durante 15 minutos
- **Resultado:** Precipitado rojo en fondo, sobrenadante amarillo
- Descartar sobrenadante
- **Mantener:** Precipitado (nanopartículas)

36 Lavado con etanol (Ciclo 1):

- Agregar 30 mL de etanol absoluto al precipitado
- Resuspender con varilla de vidrio
- Centrifugar a 9,000 rpm durante 10 minutos
- Descartar sobrenadante
- Mantener precipitado

37 Lavado con etanol (Ciclo 2):

- Repetir paso anterior
- Centrifugar a 9,000 rpm durante 10 minutos

- Descartar sobrenadante

38 Lavado con agua destilada:

- Agregar 30 mL de agua destilada
- Resuspender y centrifugar a 9,000 rpm durante 10 minutos
- Descartar sobrenadante
- Mantener precipitado

39 Secado final:

- Transferir precipitado a cápsula de porcelana
- Secar en horno de vacío a 40°C durante 2-4 horas
- **Resultado:** Polvo rojo-marrón seco

4.5 Caracterización de Nanopartículas Sintetizadas

Parámetros a verificar:

Parámetro	Valor Esperado	Método
Color	Rojo-marrón oscuro	Inspección visual
Tamaño	20-50 nm	TEM (Microscopía)
Pureza	> 95% Cu	XRD (Difracción)
Densidad	8.96 g/cm ³	Picnometría
Área superficial	50-100 m ² /g	BET

5. PROTOCOLO DE FORMULACIÓN DE TINTA CONDUCTIVA (PVA)

5.1 Preparación de Solución de PVA

Tiempo: 45 minutos

Procedimiento:

40 Pesaje de PVA:

- Pesar 10 g de PVA (grado 87-89%, Mw 10,000-20,000)
- Usar balanza analítica

41 Disolución en agua:

- Verter 70 mL de agua destilada en vaso de precipitado de 250 mL
- Calentar a 80-90°C (NO hervir)
- Agregar PVA lentamente bajo agitación magnética
- Mantener temperatura 80-90°C durante 20 minutos
- **Resultado:** Solución transparente viscosa

42 Enfriamiento:

- Permitir enfriamiento a temperatura ambiente
- Agitar ocasionalmente durante enfriamiento
- Tiempo total: 20-30 minutos

43 Verificación:

- Transparencia: Completa
- Viscosidad: Debe fluir lentamente
- Ausencia de grumos

5.2 Preparación de Dispersión de Nanopartículas

Tiempo: 30 minutos

Procedimiento:

44 Pesaje de nanopartículas:

- Pesar 20 g de nanopartículas de Cu sintetizadas
- Usar balanza analítica

45 Dispersión inicial:

- Verter nanopartículas en vaso de precipitado de 100 mL
- Agregar 10 mL de etanol absoluto
- Agitar manualmente con varilla de vidrio durante 2 minutos

46 Sonicación:

- Colocar vaso en sonicador ultrasónico
- Sonicar durante 15 minutos a potencia media
- **Objetivo:** Romper aglomerados de nanopartículas
- **Resultado:** Suspensión homogénea rojo-oscura

47 Verificación:

- Homogeneidad: Sin sedimentación visible
- Color: Rojo-oscura uniforme
- Ausencia de grumos

5.3 Mezcla Final de Tinta Conductiva

Tiempo: 20 minutos

Procedimiento:

48 Mezcla de componentes:

- Verter solución de PVA (70 mL) en vaso de precipitado de 500 mL
- Agregar dispersión de nanopartículas (20 g en 10 mL etanol)
- Agregar 5 mL de glicerol (plastificante, opcional)
- Agregar 5 mL de etanol adicional

49 Mezcla homogénea:

- Agitar magnéticamente a 600 rpm durante 10 minutos
- Usar varilla de vidrio para mezcla manual si es necesario
- **Objetivo:** Distribución uniforme de nanopartículas

50 Sonicación final:

- Sonicar mezcla completa durante 10 minutos
- Potencia media
- **Resultado:** Tinta homogénea sin sedimentación

51 Verificación final:

- Viscosidad: Debe fluir como tinta (no demasiado espesa ni diluida)
- Color: Rojo-oscuro uniforme
- Estabilidad: Sin sedimentación después de 5 minutos en reposo

5.4 Composición Final de Tinta

Componente	Cantidad	% w/w
Nanopartículas de Cu	20 g	20%
Solución de PVA	70 mL (~70 g)	70%
Glicerol	5 mL (~6.3 g)	6.3%
Etanol	5 mL (~4 g)	4%
TOTAL	~100 g	100%

Propiedades de Tinta:

- **Viscosidad:** 50-150 cP (medida con viscosímetro)
 - **Densidad:** ~1.1 g/mL
 - **pH:** 5-7 (neutro)
 - **Estabilidad:** > 2 semanas a temperatura ambiente
-

6. PROTOCOLO DE APLICACIÓN Y SINTERIZACIÓN

6.1 Preparación de Sustratos

Tiempo: 15 minutos

Procedimiento:

52 Limpieza de sustratos:

- Usar vidrio, papel o poliimida
- Limpiar con etanol absoluto
- Secar con aire comprimido
- Permitir evaporación completa

53 Marcado de área de deposición:

- Marcar área de 1 cm × 1 cm con lápiz
- Usar regla para precisión
- **Objetivo:** Estandarizar área de medición

6.2 Deposición de Tinta

Tiempo: 10 minutos

Método 1: Drop-Casting (Recomendado para Laboratorio)

Procedimiento:

- 54 Usar pipeta de 100 μ L
- 55 Depositar 30 μ L de tinta en área marcada
- 56 Permitir que se distribuya naturalmente
- 57 **Resultado:** Película uniforme de ~100 μ m de espesor

Método 2: Spin Coating (Si disponible)

Procedimiento:

- 58 Depositar 50 μL en centro de sustrato
- 59 Rotar a 1,000 rpm durante 30 segundos
- 60 Resultado: Película uniforme de $\sim 50 \mu\text{m}$

Método 3: Screen Printing (Para producción)

Procedimiento:

- 61 Usar malla de 200-300 líneas/pulgada
- 62 Presión: 10-15 N/cm^2
- 63 Velocidad: 5-10 cm/s
- 64 Resultado: Película de 20-50 μm

6.3 Evaporación de Solventes

Tiempo: 90 minutos

Procedimiento:

- 65 **Evaporación a temperatura ambiente:**
 - Dejar película en aire durante 30 minutos
 - Objetivo: Evaporación inicial de etanol
 - Resultado: Película más seca pero aún flexible
- 66 **Secado en horno:**
 - Colocar sustrato en horno a 80°C
 - Mantener durante 30 minutos
 - Objetivo: Evaporación de agua residual
 - Resultado: Película seca, frágil
- 67 **Enfriamiento:**
 - Sacar del horno
 - Permitir enfriamiento a temperatura ambiente
 - Tiempo: 30 minutos

Verificación:

- Película debe estar completamente seca
- No debe haber humedad visible
- Película debe ser quebradiza

6.4 Sinterización (ETAPA CRÍTICA)

Tiempo: 120-180 minutos

Procedimiento:

Protocolo de Sinterización en 3 Etapas (RECOMENDADO)

Etapa 1: Remoción de Polímero Protector

- Temperatura: 150°C
- Tiempo: 30 minutos
- Rampa: 5°C/min desde ambiente
- Atmósfera: Aire o N₂
- Objetivo: Eliminar PVA sin dañar sustrato

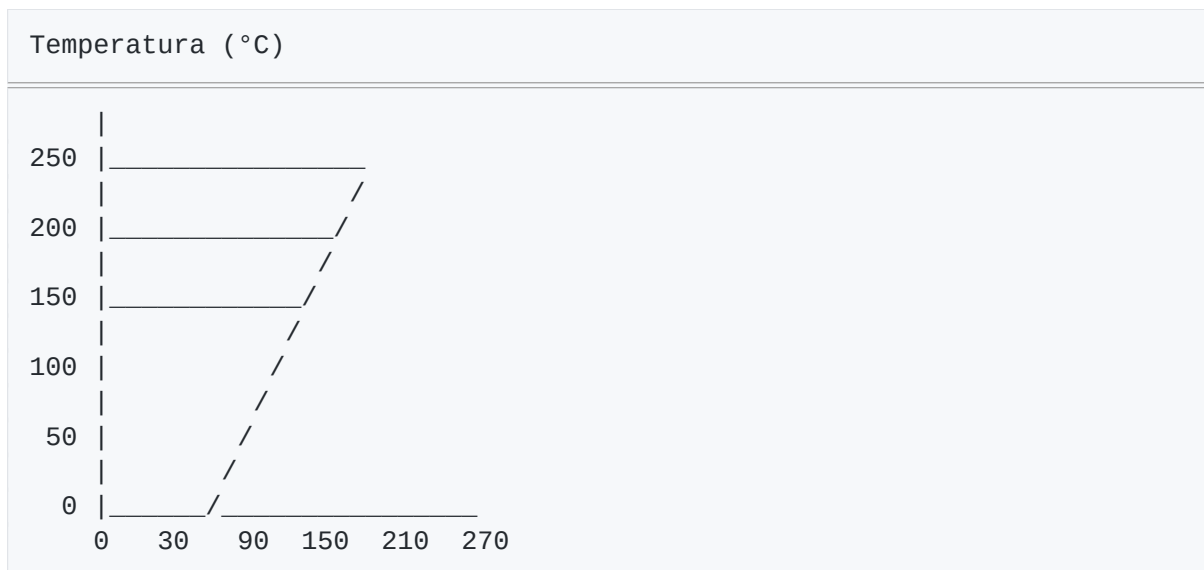
Etapa 2: Sinterización Suave

- Temperatura: 200°C
- Tiempo: 60 minutos
- Rampa: 5°C/min desde 150°C
- Atmósfera: N₂ (preferible) o aire
- Objetivo: Formación inicial de cuellos de sinterización

Etapa 3: Sinterización Óptima

- Temperatura: 250°C
- Tiempo: 60 minutos
- Rampa: 5°C/min desde 200°C
- Atmósfera: N₂ (preferible)
- Objetivo: Máxima conductividad

Perfil de Temperatura:



Enfriamiento:

- Permitir enfriamiento natural en horno
- Rampa: 5°C/min
- Tiempo total: 50 minutos
- **NO abrir horno durante enfriamiento**

6.5 Alternativa: Sinterización de Una Sola Etapa

Si no dispones de control de temperatura preciso:

- Temperatura: 250°C
- Tiempo: 120 minutos
- Rampa: 10°C/min
- Resultado: Conductividad ligeramente menor (~30% reducción)

6.6 Verificación Visual Post-Sinterización

Característica	Aceptable	Problema
Color	Rojo-marrón oscuro	Negro (oxidación)
Superficie	Lisa, brillante	Rugosa, opaca
Adhesión	Adherida al sustrato	Pelada/desprendida
Flexibilidad	Flexible (si sustrato flexible)	Frágil, quebradiza
Olor	Neutro	Quemado (T° muy alta)

7. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN

7.1 Medición de Resistencia Eléctrica

Equipamiento: Multímetro digital

Procedimiento:

68 Preparación:

- Usar película sinterizada
- Permitir enfriamiento completo
- Limpiar con aire comprimido

69 Medición de resistencia:

- Colocar puntas de multímetro en modo Ω (ohmios)
- Separación entre puntas: 1 cm
- Presionar suavemente sobre película
- Registrar lectura en ohmios

70 Cálculo de resistividad:

Fórmula:

$$\rho = R \times A / L$$

Donde:

ρ = Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)

R = Resistencia medida (Ω)

A = Área de contacto (cm^2) $\approx 0.01 \text{ cm}^2$ (punta de 1 mm^2)

L = Distancia entre puntas (cm) = 1 cm

Ejemplo:

- R medida = 50Ω
- A = 0.01 cm^2
- L = 1 cm
- $\rho = 50 \times 0.01 / 1 = 0.5 \Omega \cdot \text{cm}$

7.2 Tabla de Resistividad Esperada

Temperatura Sinterización	Tiempo	Resistividad Típica	Conductividad
200°C	60 min	956.9 $\Omega \cdot \text{cm}$	$1.04 \times 10^{-3} \text{ S/m}$
200°C	120 min	208.2 $\Omega \cdot \text{cm}$	$4.80 \times 10^{-3} \text{ S/m}$
250°C	60 min	398.3 $\Omega \cdot \text{cm}$	$2.51 \times 10^{-3} \text{ S/m}$
250°C	90 min	72.45 $\Omega \cdot \text{cm}$	$1.38 \times 10^{-2} \text{ S/m}$
250°C	120 min	53.64 $\Omega \cdot \text{cm}$	$1.86 \times 10^{-2} \text{ S/m}$
300°C	60 min	99.74 $\Omega \cdot \text{cm}$	$1.00 \times 10^{-2} \text{ S/m}$
350°C	60 min	32.42 $\Omega \cdot \text{cm}$	$3.09 \times 10^{-2} \text{ S/m}$

Interpretación:

- **Excelente:** $< 100 \Omega \cdot \text{cm}$ (comparable a cobre bulk: $1.7 \Omega \cdot \text{cm}$)
- **Bueno:** $100\text{-}500 \Omega \cdot \text{cm}$
- **Aceptable:** $500\text{-}1000 \Omega \cdot \text{cm}$
- **Pobre:** $> 1000 \Omega \cdot \text{cm}$

7.3 Pruebas Adicionales (Opcional)

Microscopía Óptica:

- Observar uniformidad de película
- Detectar grietas o defectos
- Magnificación: $10\text{-}40\times$

Prueba de Adhesión:

- Aplicar cinta adhesiva sobre película
- Despegar rápidamente
- Evaluar desprendimiento (0-100%)

Prueba de Flexibilidad:

- Doblar sustrato flexible

- Medir cambio de resistencia
- Objetivo: < 10% cambio después de 100 ciclos

8. PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

8.1 Riesgos Identificados

Riesgo	Severidad	Medida de Control
Nanopartículas inhaladas	Alta	Usar mascarilla N95, trabajar en campana
Quemaduras por calor	Alta	Usar guantes aislantes, mantener distancia
Vapores de etilenglicol	Media	Ventilación adecuada, campana de extracción
Contacto con reactivos	Media	Guantes de nitrilo, gafas de seguridad
Derrames de soluciones	Baja	Absorber con papel, limpiar con agua

8.2 Procedimientos de Emergencia

En caso de inhalación de nanopartículas:

- 71 Salir inmediatamente del área
- 72 Respirar aire fresco
- 73 Si síntomas persisten, buscar atención médica

En caso de quemadura térmica:

- 74 Aplicar agua fría durante 10-15 minutos
- 75 No usar hielo directo
- 76 Cubrir con gasa estéril
- 77 Buscar atención médica si es grave

En caso de derrame:

- 78 Absorber con papel absorbente
- 79 Limpiar con agua y jabón

8.3 Disposición de Residuos

- **Nanopartículas de cobre:** Contenedor especial para metales pesados
- **Soluciones con cobre:** Contenedor para residuos químicos
- **Papel y vidrio contaminado:** Contenedor de residuos peligrosos
- **Etanol y etilenglicol:** Contenedor para disolventes orgánicos

9. TROUBLESHOOTING (SOLUCIÓN DE PROBLEMAS)

9.1 Problemas en Síntesis de Nanopartículas

Problema	Causa Probable	Solución
Solución no cambia de color (permanece azul)	Reductor insuficiente o temperatura baja	Aumentar temperatura a 160°C, verificar ácido ascórbico
Precipitado negro (óxido)	Oxidación durante síntesis	Usar atmósfera inerte (N ₂), reducir tiempo de enfriamiento
Nanopartículas aglomeradas	Velocidad de adición muy rápida	Reducir a 0.5 mL/min, aumentar sonicación
Rendimiento bajo (< 50%)	Pérdida durante purificación	Usar velocidad de centrifugación más baja (7,000 rpm)

9.2 Problemas en Formulación de Tinta

Problema	Causa Probable	Solución
Tinta muy espesa (no fluye)	PVA concentración alta	Agregar agua destilada (5-10 mL)
Tinta muy diluida (fluye demasiado)	PVA concentración baja	Agregar más PVA disuelto (2-5 g)
Sedimentación de nanopartículas	Mala dispersión	Sonicar 20 minutos adicionales

Problema	Causa Probable	Solución
Grumos visibles	Aglomeración de nanopartículas	Filtrar con papel de 0.45 μm

9.3 Problemas en Aplicación y Sinterización

Problema	Causa Probable	Solución
Película no adherida al sustrato	Sustrato no limpio o PVA insuficiente	Limpiar sustrato con etanol, aumentar % PVA a 12%
Película quebradiza/frágil	Exceso de sinterización	Reducir temperatura a 230°C o tiempo a 60 min
Resistencia muy alta (> 1000 $\Omega \cdot \text{cm}$)	Sinterización incompleta	Aumentar temperatura a 280°C o tiempo a 120 min
Película se pela después de sinterización	Adhesión pobre	Agregar 2% de agente adhesivo (silano)
Película se oxida (color negro)	Oxidación de cobre	Sinterizar en atmósfera de N_2 , no aire

10. TABLA RESUMEN DE PARÁMETROS CRÍTICOS

Parámetro	Valor	Tolerancia	Unidad
Temperatura de síntesis	150	± 5	$^{\circ}\text{C}$
Tiempo de síntesis	120	± 10	min
Velocidad de adición	1	± 0.2	mL/min
Temperatura de sinterización	250	± 10	$^{\circ}\text{C}$

Parámetro	Valor	Tolerancia	Unidad
Tiempo de sinterización	90	±15	min
Rampa de temperatura	5	±1	°C/min
Concentración de PVA	10	±1	% w/w
Concentración de Cu NPs	20	±2	% w/w
Resistividad objetivo	50-100	-	Ω·cm

11. REFERENCIAS CIENTÍFICAS

- 81 Li, K., & Jiang, X. (2024). "The Synthesis of Copper Nanoparticles for Printed Electronic Materials Using Liquid Phase Reduction Method." *Materials*, 17(13), 3069.
 - 82 Zhang, Y., et al. (2014). "Copper Nanoparticles: Aqueous Phase Synthesis and Conductive Films Fabrication at Low Sintering Temperature." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(1), 560-567.
 - 83 Park, B.K., et al. (2007). "Direct Writing of Copper Conductive Patterns by Ink-Jet Printing." *Thin Solid Films*, 515(19), 7706-7711.
 - 84 Hu, A., et al. (2010). "Low Temperature Sintering of Ag Nanoparticles for Flexible Electronics Packaging." *Applied Physics Letters*, 97, 153117.
-

12. NOTAS FINALES

Tiempo Total del Protocolo

Fase	Tiempo
Síntesis de nanopartículas	3-4 horas
Purificación	1 hora
Formulación de tinta	1 hora
Deposición	0.5 horas
Sinterización	3-4 horas
TOTAL	8-10 horas

Rendimiento Esperado

- **Síntesis:** 70-80% de rendimiento
- **Purificación:** 90-95% recuperación
- **Tinta:** 100% utilizable
- **Película conductiva:** 80-90% de muestras exitosas

Costo Estimado

Material	Costo
Reactivos químicos	\$50-100 USD
Sustratos	\$20-50 USD
Energía (horno/baño)	\$10-20 USD



Material	Costo
TOTAL POR LOTE	\$80-170 USD

Costo por muestra: \$2-5 USD (para 20-30 muestras)

Documento Preparado: Mayo 2026

Versión: 1.0

Clasificación: Protocolo Técnico Experimental

Autor: Basado en literatura científica verificada (MDPI, ACS, RSC)