



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TORQUE DE APRIETE EN LA EFICACIA
DEL CONECTOR RANURA PARALELA PERNO CENTRAL EN LOS
CONDUCTORES ELÉCTRICOS 6 Y 4/0 AWG COMERCIALIZADO EN ECUADOR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: BYRON RAFAEL LEDESMA URBINA

TUTOR: LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN

Quito – Ecuador

2026

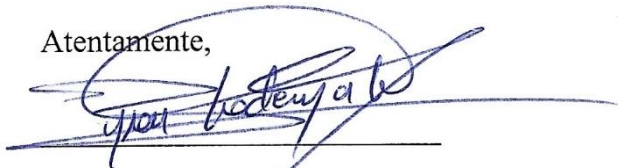
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Byron Rafael Ledesma Urbina con documento de identificación No 1720771557, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 febrero de 2026

Atentamente,



Byron Rafael Ledesma Urbina

1720771557

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Byron Rafael Ledesma Urbina con documento de identificación No 1720771557, expreso mi voluntad y por medio presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor de la propuesta tecnológica “Análisis de la influencia del torque de apriete en la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en Ecuador”, el cual ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 febrero de 2026

Atentamente,


Byron Rafael Ledesma Urbina
1720771557

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN con documento de identificación No 1713704508, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TORQUE DE APRIETE EN LA EFICACIA DEL CONECTOR RANURA PARALELA PERNO CENTRAL EN LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS 6 Y 4/0 AWG COMERCIALIZADO EN ECUADOR

realizado por Byron Rafael Ledesma Urbina con documento de identificación No 1720771557, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 febrero de 2026

Atentamente,



Ing. Luis Christian Juiña Quilachamín, MSc.

1713704508

DEDICATORIA

Con profundo cariño y gratitud, dedico
esta tesis a mí mismo, por haber
confiado en mis capacidades, por
perseverar sin rendirme y por
mantenerme firme incluso en los
momentos más difíciles.

Aunque no tuve días de descanso, logré
equilibrar mi vida académica y laboral,
realizando un esfuerzo adicional que
hoy se materializa en este logro.

Siempre recordando:

“Cuando el sendero de la vida es difícil
se aprende a templar más el alma,
y los **Mejías** tenemos el alma de acero
para elevarnos hacia las estrellas”

Per Aspera Ad Astra

Byron Rafael Ledesma Urbina

AGRADECIMIENTO

Quiero comenzar agradeciendo a mi madre, Narciza Marisol Urbina Ruíz, por ser el pilar inquebrantable en mi vida. Su palabra cálida me alienta cuando todo parece perdido, su bendición me acompaña y guía mi camino, con su ejemplo me formó en valores y fortaleza. Gracias por criar al ser que hoy soy.

Con especial cariño, a Diana Karolina Chavez Mendoza, quien creyó y apostó por mí en este extenso recorrido. Estas palabras no alcanzan a expresar toda mi gratitud por su apoyo constante y su fe inquebrantable.

A mi fiel compañero, Sr. Max, mi perrito, gracias infinitas por tu compañía incondicional y silenciosa. Fuiste un refugio de paz y ternura a lo largo de tu corta existencia 🐾.

Finalmente, agradezco al Eco. Rafael Vicente Correa Delgado, cuyo liderazgo, visión y compromiso con la equidad social marcaron una etapa trascendental para la juventud ecuatoriana. ¡Misión cumplida!

INDICE GENERAL

RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I MARCO TEÓRICO	3
1.1. TORQUE DE APRIETE Y ACOPLER ELÉCTRICOS	3
1.2. CONECTORES DE RANURA PARALELA CON PERNO CENTRAL.....	4
1.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TORQUE DE APRIETE EN CONECTORES DE RANURA PARALELA.....	5
1.3.1. Dureza y ductilidad del material del conductor	6
1.3.2. Geometría del conector	6
1.3.3. Coeficiente de fricción	6
1.3.4. Propiedades mecánicas del material del conector	7
1.3.5. Condiciones ambientales.....	7
1.4. TEORÍA DE LA ELASTICIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES	7
1.4.1. Fundamentos de la teoría de la elasticidad.....	8
1.4.2. Resistencia de Materiales y Criterios de Falla	13
1.5. TEORÍAS DE FALLA	14
1.5.1. Teoría del esfuerzo cortante máximo (criterio de tresca).....	14
1.5.2. Teoría de la energía de distorsión (criterio de von mises).....	14
1.6. APLICACIÓN A LOS CONECTORES DE RANURA PARALELA	15
1.6.1. Distribución de esfuerzos	15
1.6.2. Análisis de deformación.....	15
1.6.3. Predicción de falla.....	15
1.6.4. Efectos térmicos	16
1.7. AJUSTE DE APRIETE EN CONECTORES DE RANURA PARALELA.....	16
1.8. FÓRMULA DE TORQUE DE APRIETE	17
1.9. APLICACIÓN DE LA FÓRMULA EN CONECTORES DE RANURA PARALELA.....	18
1.9.1. Contexto técnico.....	19
1.9.2. Aplicar el torque correcto asegura:	19
1.9.3. Importancia de las especificaciones del fabricante	19

1.9.4.	Aplicación de la fórmula	20
1.9.4.1.	Ejemplo práctico para conductores 6 y 4/0 AWG:	20
1.9.5.	Ajustes según condiciones:	21
1.10.	IMPORTANCIA DE UN AJUSTE ADECUADO DEL TORQUE	21
CAPITULO II MARCO METODOLÓGICO		23
2.1.	ENFOQUE MECÁNICO APLICADO	23
2.2.	TIPO DE ESTUDIO	23
2.2.1.	Procedimientos de prueba estandarizados	24
2.2.2.	Rigor metodológico y consistencia científica	24
2.2.3.	Alcance y enfoque	25
2.3.	JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	25
2.3.1.	Brecha en la investigación local	26
2.3.2.	Selección del conductor: 6 AWG y 4/0 AWG	26
2.3.3.	Rigor estadístico y controles experimentales	27
2.4.	VARIABLES DEL ESTUDIO	27
2.4.1.	Variable independiente	28
2.4.2.	Variables dependientes	28
2.4.3.	Variables controladas.....	29
2.4.4.	Flujograma	29
2.5.	MATERIALES Y EQUIPO EXPERIMENTAL	32
2.5.1.	Conductores eléctricos para pruebas mecánicas	32
2.5.2.	Conectores de ranura paralela con perno central	33
2.5.3.	Herramienta de apriete	34
2.5.4.	Equipo de Tracción Axial.....	34
2.5.5.	Otros equipos y materiales auxiliares.....	35
CAPÍTULO III PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....		36
3.1.	DISEÑO DEL PROTOCOLO EXPERIMENTAL	36
3.1.1.	Marco normativo y técnico	36
3.1.2.	Definición de variables experimentales	36
3.1.3.	Selección del nivel de par.....	37
3.1.4.	Diseño factorial y réplica	37

3.1.5. Equipos e instrumentación	38
3.1.6. Procedimiento experimental.....	38
3.1.7. Medidas de control de calidad.....	39
3.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	39
3.2.1. Selección de los conectores.....	40
3.2.2. Conductores eléctricos utilizados.....	43
3.2.3. Herramientas y equipos de preparación	44
3.2.4. Proceso de preparación.....	45
3.2.5. Control de calidad	46
3.3. APLICACIÓN DEL TORQUE.....	47
3.3.1. Objetivo de la aplicación del torque.....	47
3.3.2. Cálculo teórico de niveles de torque a utilizados	47
3.4. ENSAYO DE TRACCIÓN AXIAL	48
3.4.1. Objetivo del ensayo de tracción axial	49
3.4.2. Valor constante k utilizado	50
3.4.3. Fórmula utilizada.....	51
3.4.4. Datos obtenidos durante los ensayos de laboratorio	52
3.4.5. Equipos de prueba	57
3.5. EVALUACIÓN DEL ENSAYO DE LABORATORIO.....	58
3.5.1. Inspección visual	58
3.5.2. Mediciones dimensionales	60
3.5.3. Clasificación de modos de falla	62
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	65
4.3. ANÁLISIS TÉCNICO	67
4.3.1. Relación torque-fuerza axial	67
4.3.2. Evaluación de la fuerza de fricción	68
4.4. CORRELACIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL ESTUDIO	70
4.5. ANÁLISIS DE ENSAYOS INDIVIDUALES REPRESENTATIVOS	71
4.5.1. Para el proveedor A	72
4.5.2. Para el proveedor B	85

4.5.3. Para el proveedor C	99
4.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	113
CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESFUERZO NORMAL – ANÁLISIS DE SUPERFICIES [8]	9
FIGURA 2: ESFUERZO CORTANTE	9
FIGURA 3: TENSOR DE ESFUERZOS	9
FIGURA 4: DEFORMACIÓN (E)	10
FIGURA 5A: ESFUERZO TANGENCIAL CORTANTE (τ)	12
FIGURA 6B: DEFORMACIÓN CORTANTE (γ)	12
FIGURA 7: CONECTOR RANURA PARALELA PERNO CENTRAL	17
FIGURA 8: PAR DE APRIETE (TORQUE)	19
FIGURA 9: REPRESENTACIÓN DEL TORQUE	22
FIGURA 10: PROCESO METODOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	31
FIGURA 11: PROBETA PARA PROTOCOLO DE PRUEBA	32
FIGURA 12: PROBETAS PARA ENSAYO EN MÁQUINA UNIVERSAL	40
FIGURA 13: CONECTORES RANURA PARALELA PERNO CENTRAL	43
FIGURA 14: ENSAYO DE TRACCIÓN AXIAL	49
FIGURA 15: REPRESENTACIÓN DE FALLA	53
FIGURA 16: CEDENCIA DE CONDUCTOR DE COBRE (Cu).....	54
FIGURA 17: FRACTURA DE CONDUCTOR DE ALUMINIO (Al).....	54
FIGURA 18: FRACTURA CORTANTE EN EL CONDUCTOR DE ALUMINIO (Al).....	56
FIGURA 19: CONECTOR RANURA PARALELA DESPUÉS DE LA FRACTURA DEL CONDUCTOR DE ALUMINIO (Al).....	59
FIGURA 20: TABLA DE CORRELACIÓN TIEMPO VS CARGA.....	70
FIGURA 21: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_A_1	72
FIGURA 22: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_A_2	75
FIGURA 23: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_A_3	78
FIGURA 24: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_A_4	80
FIGURA 25: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_A_5	83
FIGURA 26: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_B_1	86
FIGURA 27: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_B_2	89
FIGURA 28: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_B_3	92
FIGURA 29: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_B_4	94
FIGURA 30: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_B_5	97

FIGURA 31: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_C_1	100
FIGURA 32: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_C_2	103
FIGURA 33: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_C_3	106
FIGURA 34: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_C_4	108
FIGURA 35: ANÁLISIS DEL ENSAYO MEC_PROV_C_5	111
FIGURA 36: TABLA COMPARATIVA DE DESEMPEÑO POR CADA UNA DE LAS PROBETAS DEL PROVEEDOR	114
FIGURA 37: TABLA DE CORRELACIÓN DE LOS 15 ENSAYOS	116

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: VARIABLES CONTROLADAS	29
TABLA 2: TABLA AQL PARA CRITERIO DE SELECCIÓN [17]	42
TABLA 3: TABLA AQL PARA SELECCIÓN DE CANTIDAD DE PROBETAS [17]	42
TABLA 4: RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	52
TABLA 5: MEDICIONES DIMENSIONALES	60
TABLA 6: MEDICIONES DESPUÉS DE LOS ENSAYOS	61
TABLA 7: RESULTADOS MÁS SIGNIFICATIVOS	63
TABLA 8: RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES COMPARATIVOS	66
TABLA 9: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE COMPRESIÓN TEÓRICAS Y FUERZAS MÁXIMAS EXPERIMENTALES	68
TABLA 10: ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA	69
TABLA 11: TABLA COMPARATIVA DE DESEMPEÑO DE CASO MÁS SIGNIFICATIVO POR PROVEEDOR	117

Resumen

Esta investigación examinó minuciosamente el impacto del torque de apriete sobre el rendimiento de los conectores de ranura paralela con perno central, utilizados en conductores eléctricos de calibres 6 y 4/0 AWG disponibles en el mercado ecuatoriano. Así, se buscó precisar de qué manera las diferencias en el torque inciden en la calidad de la unión eléctrica, tomando en cuenta indicadores esenciales como la resistencia de contacto y la firmeza mecánica del conjunto. Por ello, se adoptó una metodología experimental a través de ensayos de laboratorio que facilitaron la medición de los impactos generados por diversos niveles de torque en la funcionalidad de estos conectores.

Esas evaluaciones incorporaron escenarios simulados que emulaban situaciones operativas auténticas, tales como vibraciones y variaciones en la tensión, con el objetivo de capturar mediciones exactas y definir un intervalo ideal para el torque de apriete. De esta forma, los hallazgos revelaron que valores de torque por debajo de lo sugerido elevaron considerablemente la resistencia de contacto y generaron defectos mecánicos, en tanto que un torque superior indujo distorsiones en las áreas de contacto, lo cual disminuyó su efectividad. Por el contrario, el intervalo óptimo de torque optimizó la robustez mecánica y redujo las disipaciones de energía.

En resumen, el presente trabajo resalta la importancia de emplear un torque apropiado para asegurar uniones eléctricas confiables y óptimas, aportando de forma sustancial al perfeccionamiento de los procedimientos de montaje en instalaciones eléctricas del ámbito local.

Palabras claves: conectores eléctricos, torque de apriete, conductores AWG, resistencia de contacto, estabilidad mecánica

Abstract

This study conducted an in-depth analysis of the influence exerted by tightening torque on the efficiency of parallel groove connectors with central bolts, used in 6 and 4/0 AWG electrical conductors marketed in Ecuador. The primary objective was to determine how variations in torque directly impact the quality of electrical connections, focusing on key parameters such as contact resistance and mechanical stability.

An experimental approach was employed, involving laboratory tests to assess the effects of different torque values on connector efficiency. These tests included simulations replicating real operating conditions, such as vibrations and thermal fluctuations, to collect precise data and establish an optimal tightening range.

The findings revealed that torque below the recommended levels significantly increased contact resistance and led to mechanical failures, while excessive torque caused deformations on contact surfaces, reducing their effectiveness. In contrast, the optimal torque range maximized mechanical stability and minimized energy losses.

In conclusion, this study underscores the importance of applying proper torque to ensure safe and efficient electrical connections, significantly contributing to the improvement of installation practices in local electrical systems.

Keywords: electrical connectors, tightening torque, AWG conductors, contact resistance, mechanical stability

INTRODUCCIÓN

PROBLEMA DE ESTUDIO

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es analizar el efecto del par de apriete sobre la efectividad del acoplamiento de conectores de ranura paralela con pin central en conductores eléctricos, tanto de calibre 6 como de calibre 4/0 AWG. El desempeño de los acoplamientos eléctricos se encuentra estrechamente condicionado por la precisión del ajuste mecánico en las uniones; en consecuencia, un par de apriete inadecuado puede inducir fallas en dichos acoplamientos, lo cual origina reducciones significativas tanto en la eficiencia operativa como en los niveles de seguridad del sistema.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como propósito fundamental asegurar los estándares de seguridad y eficiencia en aquellos ámbitos donde las uniones eléctricas constituyen un elemento determinante para la prevención de fallas de índole mecánica y eléctrica; asimismo, dicho estudio reviste importancia para perfeccionar los procedimientos de instalación asociados con los conductores eléctricos; en efecto, resulta indispensable optimizar el par de apriete en las juntas de ranura paralela con el fin de prevenir el deslizamiento de los componentes y, de este modo, incrementar la longevidad operativa de la unión.

GRUPO OBJETIVO

La población destinataria de la presente investigación comprende técnicos especializados, ingenieros y profesionales del sector eléctrico cuya labor cotidiana implica la ejecución de uniones eléctricas mediante el empleo de conectores de ranura paralela equipados con perno central; en consecuencia, dichos especialistas requieren acceso a datos técnicos exactos y debidamente validados acerca del valor óptimo de par de apriete correspondiente a estos dispositivos, con el propósito de garantizar la correcta ejecución y seguridad operativa de las conexiones realizadas.

También es importante apretar estos acoples correctamente para que no haya deslizamiento en las juntas, se mantenga la integridad del conductor y se preserve la eficiencia eléctrica. La investigación proporcionará datos que permitirán a los profesionales de la industria optimizar adecuadamente el proceso de instalación con la garantía de acoples estables, especialmente para

aquellas que pueden soportar tensiones mecánicas y eléctricas, en particular para instalaciones aéreas.

Los parámetros técnicos sobre el par de apriete adecuado a los que se hace referencia en este estudio mejoran los estándares de seguridad con respecto a los acoples eléctricos y previenen fallas mecánicas de los conectores de ranura paralela en varias aplicaciones industriales y comerciales.

Objetivo general

Analizar la influencia del torque de apriete en la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en el Ecuador.

Objetivos específicos

- ✓ Identificar los factores significativos que impactan en el acoplamiento del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en Ecuador.
- ✓ Evaluar la eficacia del par de apriete de torsión en conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en Ecuador mediante diseño experimental con variables significativas.
- ✓ Determinar un modelo de torque de apriete versus la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en Ecuador.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

Este capítulo cubre cuestiones básicas relacionadas con el par de apriete y la eficiencia de rendimiento en conectores de ranura paralela perno central. la primera parte analiza las definiciones de los términos generales relevantes en el dominio de los sistemas de conexión eléctrica, en general, en los dominios del par mecánico. Luego, se dan explicaciones que hacen referencia a la física y la mecánica subyacentes cuando se trata del mecanismo de funcionamiento de dichos actuadores. A continuación, se revisan las características de los parámetros técnicos del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG.

Con base en una revisión exhaustiva de documentos técnicos, manuales e informes, se cubren los factores que influyen en la conexión eficiente del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG, como la presión de contacto, la resistencia mecánica. Se aborda los fundamentos teóricos relacionados con los conectores eléctricos de ranura paralela, incorporando además las normas internacionales aplicadas a las pruebas de par y conexión como referencia para los procedimientos experimentales; asimismo, se integran metodologías de medición y técnicas de evaluación con el propósito de concluir mediante la valoración de la eficiencia del conector en términos de resistencia mecánica, integridad estructural y durabilidad operativa.

1.1. Torque de apriete y acoples eléctricos

En términos conceptuales, el acoplamiento eléctrico constituye una unión de naturaleza mecánica entre conductores mediante la cual se permite el transporte de corriente eléctrica. Este proceso involucra diversos factores críticos para su correcto funcionamiento, siendo el torque de apriete uno de los más relevantes. El torque de apriete se define como la fuerza rotacional aplicada a un perno o tornillo con el fin de garantizar una conexión mecánica adecuada entre los componentes del sistema.

Por otra parte, cuando el torque de apriete resulta insuficiente, las conexiones pueden experimentar aflojamiento progresivo con el transcurso del tiempo, lo cual origina un incremento en la resistencia de contacto. Este aumento de resistencia provoca una mayor generación de calor debido a la oposición al flujo de corriente, lo que compromete la seguridad

del sistema. En condiciones extremas, este fenómeno puede derivar en fallas mecánicas graves o incluso en incendios, afectando no solo la eficiencia operativa, sino también la integridad de la infraestructura eléctrica.

No obstante, un torque de apriete excesivo implica asimismo una problemática de considerable relevancia técnica; en tales circunstancias, las roscas del conector o del conductor pueden experimentar deterioros irreversibles que comprometen la integridad estructural de la unión. Además, la deformación de las superficies de contacto reduce la capacidad efectiva de conducción de corriente, afectando negativamente el desempeño del sistema y generando pérdidas energéticas que pueden impactar en el rendimiento general de la instalación [1].

Ante este panorama, se torna imperativo determinar y establecer un intervalo óptimo de torque que permita asegurar la seguridad y eficiencia de las conexiones eléctricas, minimizando simultáneamente los riesgos asociados tanto al daño mecánico como a las disipaciones energéticas. Para alcanzar dicho propósito, resulta indispensable capacitar al personal técnico en la aplicación correcta del torque, junto con la utilización de instrumentos debidamente calibrados que posibiliten un control exacto del ajuste mecánico. Esta estrategia no solamente incrementa la confiabilidad de las uniones, sino que además favorece la extensión de la vida útil de los componentes eléctricos y la reducción de los costos operativos de mantenimiento.

Cabe destacar que el análisis del torque de apriete trasciende las prácticas convencionales de instalación, puesto que constituye un elemento fundamental en la elaboración de normativas técnicas que regulen su aplicación adecuada en el sector eléctrico. La investigación sistemática y el examen permanente en esta área resultan cruciales para garantizar que las conexiones eléctricas preserven su integridad física y funcionalidad operativa a lo largo del ciclo de vida útil, asegurando así los estándares de seguridad y eficiencia en los sistemas eléctricos [2].

1.2. Conectores de ranura paralela con perno central

En el ámbito de las aplicaciones eléctricas y mecánicas, los conectores de ranura paralela con perno central se emplean extensamente debido a su capacidad para establecer uniones estables y seguras entre conductores. Este tipo de conector está diseñado de manera que el conductor se acomode dentro de una ranura paralela, mientras que un perno ubicado en la parte central aplica presión para mantenerlo firmemente en su lugar. La efectividad de esta conexión depende de

múltiples factores, incluyendo la geometría del conector, las propiedades mecánicas de los materiales empleados y el torque de apriete aplicado.

Respecto a sus características funcionales, un atributo distintivo de estos dispositivos radica en su aptitud para distribuir uniformemente las tensiones mecánicas que actúan sobre el conductor. Al apretar el perno, se genera una fuerza de compresión entre el conductor y las paredes internas de la ranura; dicha fuerza permite maximizar la superficie de contacto y minimizar la resistencia eléctrica, asegurando una conexión eficiente [2].

La idoneidad funcional de estos dispositivos se encuentra íntimamente relacionada con las características mecánicas inherentes a los materiales seleccionados para su manufactura; en efecto, dichas propiedades constituyen un elemento determinante en el comportamiento operativo del conector. En la mayoría de los casos, los conectores de ranura paralela están fabricados con aleaciones de cobre o aluminio, materiales que ofrecen una excelente conductividad eléctrica sin comprometer la resistencia mecánica. También es esencial considerar el tipo de conductor utilizado, ya sea de cobre o aluminio, ya que cada metal posee distintos niveles de ductilidad y resistencia a la deformación.

En relación con las condiciones superficiales, un factor decisivo en el comportamiento de la unión corresponde al estado físico de las interfaces en contacto. Las superficies secas suelen presentar un coeficiente de fricción más alto, lo que puede influir en los valores de torque necesarios para lograr una fijación adecuada; por el contrario, las superficies lubricadas o sometidas a tratamientos previos optimizan el procedimiento de ajuste, disminuyendo el desgaste progresivo y favoreciendo la longevidad operativa del conjunto.

Desde el punto de vista de la ingeniería aplicada, lograr una armonización apropiada entre la sollicitación mecánica por compresión y el rendimiento eléctrico constituye un requisito indispensable para asegurar la estabilidad funcional prolongada de la conexión. La correcta aplicación del torque, siguiendo las especificaciones del fabricante, permite prevenir problemas como el sobrecalentamiento, el aflojamiento mecánico o las fallas eléctricas, contribuyendo a la seguridad y estabilidad de los sistemas eléctricos.

1.3. Factores que influyen en el torque de apriete en conectores de ranura paralela

En el contexto específico de los conectores de ranura paralela equipados con perno central, la magnitud del torque de apriete aplicado responde a una multiplicidad de variables

interdependientes que inciden simultáneamente en la solidez mecánica de la unión y en su eficiencia desde el punto de vista eléctrico. Comprender estos factores es crucial para garantizar un acoplamiento eléctrico seguro, duradero y eficiente, especialmente en sistemas de distribución de energía donde la confiabilidad es prioritaria [3].

1.3.1. Dureza y ductilidad del material del conductor

Las características mecánicas inherentes al conductor, en especial su grado de dureza y su capacidad de deformación plástica, constituyen variables decisivas para establecer el valor óptimo de torque; en efecto, materiales de mayor rigidez, como determinadas aleaciones de aluminio, presentan una marcada resistencia a la deformación, lo cual exige un torque superior para alcanzar una unión segura. Por el contrario, materiales más blandos y dúctiles, como el cobre, son más propensos a deformarse bajo compresión. Un torque excesivo sobre un conductor dúctil puede provocar una deformación permanente, reduciendo la calidad del contacto y potencialmente causando sobrecalentamiento debido al aumento de la resistencia eléctrica.

1.3.2. Geometría del conector

La configuración estructural de la ranura paralela junto con el perno central incide directamente en la distribución de las tensiones mecánicas y en la magnitud de fuerza necesaria para un ajuste adecuado; por consiguiente, conectores provistos de ranuras más estrechas generan una mayor concentración de presión sobre el conductor, lo que puede incrementar el riesgo de fatiga del material a lo largo del tiempo. Por otro lado, una ranura más ancha con un diámetro de perno correctamente ajustado garantiza una distribución de fuerza más uniforme, optimizando el contacto eléctrico y previniendo daños localizados.

1.3.3. Coeficiente de fricción

El fenómeno de interacción física entre el perno, el conductor y las superficies internas de la ranura introduce una resistencia friccional que modula significativamente el torque requerido para alcanzar una unión óptima. Un coeficiente de fricción más alto (común en superficies secas u oxidadas) resulta en una mayor resistencia durante el apriete, exigiendo un torque más elevado para alcanzar la fuerza de sujeción necesaria. Por el contrario, superficies lubricadas o pretratadas reducen la fricción, requiriendo valores de torque más bajos para el mismo nivel de apriete.

1.3.4. Propiedades mecánicas del material del conector

La resistencia a la tracción y la elasticidad del material del conector determinan su capacidad para soportar las cargas mecánicas aplicadas. Materiales con alta resistencia a la tracción, como las aleaciones de cobre estañadas, pueden soportar niveles de tensión más altos sin deformarse, asegurando una conexión estable a lo largo del tiempo. Por el contrario, materiales con menor resistencia o con una pobre recuperación elástica pueden experimentar deformación por fluencia, lo que lleva a una pérdida gradual de la fuerza de sujeción y potenciales fallas eléctricas [5].

1.3.5. Condiciones ambientales

Factores externos como la temperatura, la humedad y los contaminantes atmosféricos impactan significativamente la longevidad y el rendimiento de la conexión eléctrica. Las altas temperaturas pueden acelerar los ciclos de expansión y contracción del material, lo que conduce al aflojamiento de la conexión con el tiempo. Las condiciones del entorno operativo ejercen una influencia determinante sobre el comportamiento a largo plazo de las uniones eléctricas; en consecuencia, la humedad y la corrosión pueden introducir capas de óxido en la superficie del conductor, aumentando la resistencia de contacto y reduciendo la eficiencia. Además, la exposición al polvo, a contaminantes industriales o a la niebla salina en ambientes costeros puede degradar aún más las superficies de contacto, haciendo necesario un mantenimiento periódico o recubrimientos especializados para mejorar la durabilidad [6].

1.4. Teoría de la elasticidad y resistencia de materiales

El estudio del comportamiento mecánico que exhiben los conectores de ranura paralela cuando se encuentran sometidos a cargas constituye un pilar fundamental en el proceso de diseño ingenieril, particularmente en las disciplinas eléctrica y mecánica; por ello, estos dispositivos experimentan diversas fuerzas a lo largo de su vida útil, y su desempeño está directamente relacionado con su capacidad para resistir esfuerzos y deformaciones sin comprometer su integridad estructural. La evaluación de estos factores se basa en los principios de la Teoría de la Elasticidad y la Resistencia de Materiales, disciplinas que proporcionan las bases teóricas esenciales para comprender la distribución de esfuerzos, la deformación de los materiales y los mecanismos de falla. En este apartado, se abordará el marco teórico que sustenta el análisis de

estos conectores, detallando las formulaciones matemáticas y las implicaciones prácticas de dichas teorías en su funcionamiento y diseño [7].

1.4.1. Fundamentos de la teoría de la elasticidad

La Teoría de la Elasticidad constituye una disciplina fundamental de la mecánica del continuo que examina la respuesta mecánica de los sólidos ante la aplicación de cargas externas; en este contexto, se centra en la aptitud de los materiales para experimentar deformaciones reversibles y retornar a su configuración geométrica inicial una vez removida la sollicitación, siempre y cuando dicha sollicitación no supere el umbral elástico característico del material. Esta teoría se fundamenta en conceptos clave que permiten describir y predecir el comportamiento de los materiales bajo esfuerzos mecánicos.

Esfuerzo (σ): Desde una perspectiva mecánica, el esfuerzo se conceptualiza como la resultante de fuerzas internas distribuidas por unidad de superficie en el seno de un material; dicho parámetro cuantifica la intensidad de las fuerzas internas que se generan en respuesta a una carga externa aplicada. Matemáticamente, el esfuerzo se expresa como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

donde:

σ : representa el esfuerzo (en pascales, Pa),

F : es la fuerza aplicada (en newtons, N),

A : es el área sobre la cual se distribuye la fuerza (en metros cuadrados, m²).

Este concepto es esencial para analizar la resistencia de los conectores de ranura paralela, ya que permite determinar los límites de carga que pueden soportar antes de sufrir deformaciones permanentes o fallos estructurales.

Tipos de Esfuerzos

Esfuerzo Normal: Es el esfuerzo producido por una fuerza normal N sobre un área A . A continuación, se presenta la Figura 1 sobre el Esfuerzo Normal – Análisis de superficies [8].

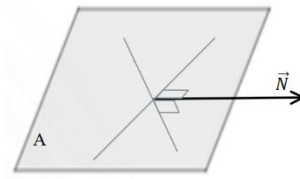


Figura 1: Esfuerzo Normal – Análisis de superficies [8]

Esfuerzo Cortante

El esfuerzo cortante está también relacionado con el área transversal A , está sujeto a un par de fuerzas que apuntan en direcciones opuestas y que están aplicadas sobre una misma superficie.

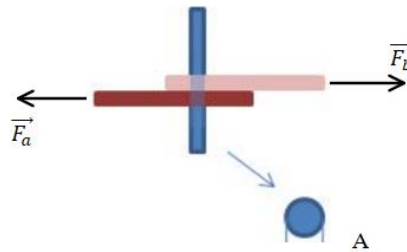


Figura 2: Esfuerzo Cortante

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Tensor de esfuerzos

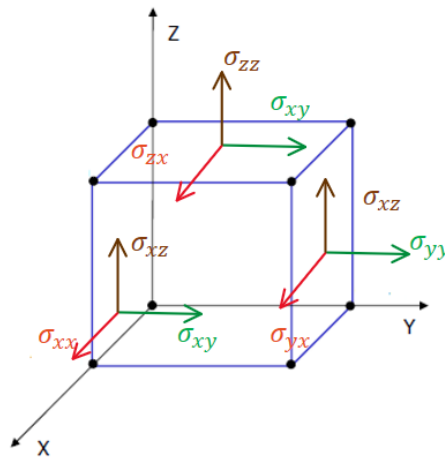


Figura 3: Tensor de esfuerzos

El tensor de esfuerzos de un cuerpo se define como la combinación de los esfuerzos cortantes y normales en cada uno de los ejes ordenados.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

La diagonal principal posee los esfuerzos normales, y los demás valores son los esfuerzos cortantes. La fuerza está definida como

$$F = \iint_A^S \sigma \cdot \vec{n} \, ds \quad (4)$$

donde \vec{n} es el vector unitario exterior normal a la superficie A .

- Deformación (ε): La deformación, representada por ε , es una medida de la variación dimensional de un material cuando se somete a una carga externa. Expresa el desplazamiento relativo entre partículas dentro del material con respecto a su longitud original. Se trata de una magnitud adimensional, ya que se obtiene como la razón entre el cambio de longitud y la longitud inicial del material. Matemáticamente, la deformación se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

Esta relación se representa gráficamente en la Figura 4, donde se ilustran los parámetros L_0 (longitud inicial) y ΔL (cambio de longitud).

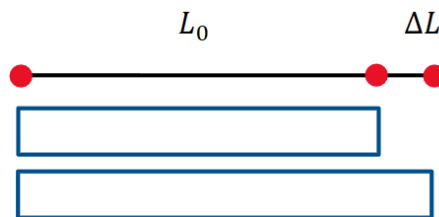


Figura 4: Deformación (ε)

donde:

ε : representa la deformación,

ΔL : es la variación de longitud experimentada por el material (en metros, m),

L_0 : es la longitud original del material antes de la aplicación de la carga (en metros, m).

Este concepto es fundamental para evaluar el comportamiento estructural de los conectores de ranura paralela bajo carga, ya que permite determinar hasta qué punto un material puede alargarse o comprimirse sin superar su límite elástico ni sufrir deformaciones irreversibles.

- Ley de Hooke: Dentro del límite elástico de un material, existe una relación directamente proporcional entre el esfuerzo y la deformación. Este principio, formulado en la Ley de Hooke, se expresa matemáticamente como:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

donde:

σ : representa el esfuerzo (en pascales, Pa),

E : es el módulo de elasticidad de Young (en pascales, Pa), una propiedad intrínseca del material que indica su rigidez,

ε : es la deformación unitaria.

Esta ecuación es fundamental en la ingeniería estructural y mecánica, ya que permite predecir el comportamiento elástico de los materiales y diseñar componentes que operen dentro de sus límites sin sufrir deformaciones permanentes

- Esfuerzo tangencial Cortante (τ) y Deformación Cortante (γ): Además del esfuerzo y la deformación normales, el análisis de los conectores de ranura paralela requiere considerar el esfuerzo cortante y la deformación cortante, ya que estos elementos suelen estar sometidos a fuerzas tangenciales que pueden comprometer su resistencia estructural.

El esfuerzo cortante tangencial se define como la fuerza aplicada tangencialmente por unidad de área y se expresa mediante la ecuación:

$$\tau = \frac{F_{cortante}}{A} \quad (7)$$

La Figura 5a ilustra esquemáticamente la acción de una fuerza cortante sobre un área y la distribución resultante del esfuerzo tangencial τ . Por otro lado, la deformación angular asociada, conocida como deformación cortante (γ), se representa en la Figura 6b.

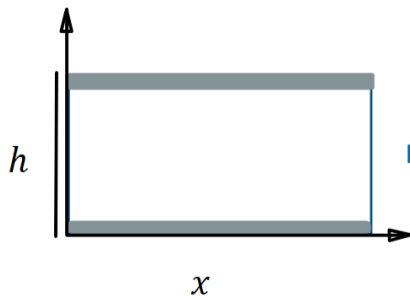


Figura 5a: Esfuerzo tangencial Cortante (τ)

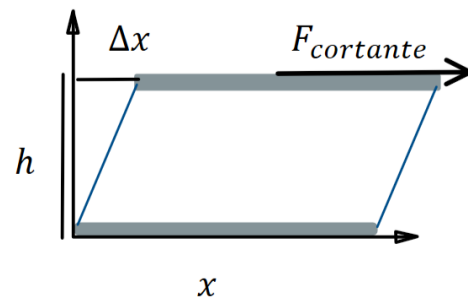


Figura 6b: Deformación Cortante (γ)

donde:

τ : es el esfuerzo cortante (en pascales, Pa),

$F_{costante}$: representa la fuerza cortante aplicada (en newtons, N),

A : es el área sobre la cual actúa la fuerza cortante (en metros cuadrados, m^2).

Por otro lado, la deformación cortante se define como la razón entre el desplazamiento lateral de un material debido a una fuerza tangencial y su altura inicial. Matemáticamente, se expresa como:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad (8)$$

donde:

γ : es la deformación cortante,

Δx : representa el desplazamiento lateral debido al corte (en metros, m),

h : es la altura del material antes de la deformación (en metros, m).

Este tipo de análisis es especialmente relevante en elementos estructurales delgados o en conexiones mecánicas donde las fuerzas no actúan perpendicularmente a la superficie, sino en direcciones paralelas.

- Coeficiente de Poisson (ν): El coeficiente de Poisson describe la relación entre la deformación transversal y la deformación axial de un material sometido a un esfuerzo unidireccional. Se expresa como:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{axial}} \quad (9)$$

donde:

ν : es el coeficiente de Poisson (adimensional),

$\epsilon_{transversal}$: representa la deformación en la dirección perpendicular a la fuerza aplicada,

ϵ_{axial} : es la deformación en la misma dirección de la carga aplicada.

Este coeficiente indica cómo un material se contrae o expande lateralmente cuando se somete a un esfuerzo axial. En la mayoría de los materiales, el valor de ν varía entre 0 y 0.5, siendo un factor clave en el diseño estructural, ya que influye en la respuesta mecánica del material bajo carga.

1.4.2. Resistencia de Materiales y Criterios de Falla

El estudio de la resistencia de materiales se centra en la capacidad de un material para soportar fuerzas aplicadas sin sufrir fallas estructurales. Los conceptos clave en esta disciplina incluyen:

Límite de fluencia (σ_y)

El límite de fluencia es el esfuerzo a partir del cual un material comienza a deformarse plásticamente, es decir, cuando la carga aplicada excede este valor, la estructura no recuperará su forma original tras la eliminación del esfuerzo.

Resistencia última a la tracción (σ_u)

La resistencia última a la tracción representa el máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de fracturarse. Representa el valor máximo de esfuerzo normal que un material puede soportar antes de experimentar rotura o fractura completa; por consiguiente, es un parámetro crucial en el diseño estructural para garantizar la seguridad y durabilidad de los componentes mecánicos.

Factor de seguridad (FS)

Como principio fundamental en el dimensionamiento ingenieril, el factor de seguridad constituye un coeficiente de diseño que garantiza el funcionamiento de un componente dentro de márgenes operativos seguros, previniendo así la ocurrencia de fallas catastróficas o inesperadas; matemáticamente se expresa mediante la relación:

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_{adm}} \quad (10)$$

donde:

σ_u : corresponde a la resistencia última del material,

σ_{adm} : representa el esfuerzo admisible de trabajo.

Un factor de seguridad elevado implica un margen adicional para compensar incertidumbres en cargas, defectos del material o variaciones en las condiciones de operación [4].

1.5. Teorías de falla

El establecimiento de criterios predictivos que permitan anticipar las condiciones bajo las cuales un material experimentará pérdida de funcionalidad constituye un elemento esencial en el análisis de componentes sometidos a sollicitaciones mecánicas; entre las principales teorías utilizadas en ingeniería se encuentran:

Teoría del esfuerzo normal máximo

De acuerdo con este postulado fundamental, la falla de un material frágil ocurrirá en el instante en que el esfuerzo normal máximo desarrollado en su interior exceda el valor de resistencia última característico del material en tracción o compresión. Es una aproximación simple, pero poco precisa para materiales dúctiles.

1.5.1. Teoría del esfuerzo cortante máximo (criterio de tresca)

La teoría de Tresca establece que la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo excede la resistencia al corte del material. Se expresa mediante la ecuación:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (11)$$

donde:

σ_1 Y σ_3 son los esfuerzos principales.

Esta teoría es útil para materiales que fallan predominantemente por corte, como ciertos metales y polímeros estructurales.

1.5.2. Teoría de la energía de distorsión (criterio de von mises)

El criterio de Von Mises predice la falla en materiales dúctiles cuando el esfuerzo equivalente de Von Mises supera el límite de fluencia del material. Se calcula como:

$$\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (12)$$

Dicho modelo se emplea extensamente en el ámbito de la ingeniería mecánica con el propósito de anticipar el comportamiento resistente de elementos estructurales expuestos a estados tensionales multiaxiales [5].

1.6. Aplicación a los conectores de ranura paralela

Durante su ciclo operativo, los conectores de ranura paralela se ven afectados simultáneamente por sollicitaciones mecánicas y térmicas que influyen directamente en su desempeño operativo; para examinar su respuesta estructural se implementa una secuencia analítica compuesta por tres fases fundamentales:

1.6.1. Distribución de esfuerzos

- El conector se encuentra sometido a esfuerzos normales originados por cargas axiales junto con esfuerzos cortantes inducidos por fuerzas transversales.
- La caracterización de dicha distribución tensional se realiza mediante la aplicación de los postulados fundamentales de la teoría de la elasticidad, incorporando como parámetros determinantes tanto la configuración geométrica del conector como las propiedades mecánicas del material constitutivo.

1.6.2. Análisis de deformación

- La cuantificación de las deformaciones se efectúa a través de la Ley de Hooke en conjunto con las relaciones cinemáticas que vinculan la deformación unitaria con los desplazamientos relativos
- Particularmente en los conectores de ranura paralela, resulta indispensable limitar las magnitudes de deformación con el objetivo de preservar la calidad del contacto eléctrico y prevenir tanto desconexiones involuntarias como degradación en la transmisión de energía.

1.6.3. Predicción de falla

- Para componentes fabricados con materiales dúctiles, se adopta el criterio de Von Mises como metodología predictiva de falla por fluencia plástica

- En contraste, cuando se trata de materiales frágiles, se aplica la teoría del esfuerzo normal máximo debido a que estos exhiben una tendencia predominante a fracturarse de forma abrupta sin manifestar deformaciones plásticas apreciables antes de la rotura.

1.6.4. Efectos térmicos

La dilatación térmica genera esfuerzos secundarios no deseados en el conector; por consiguiente, dichos esfuerzos comprometen tanto el rendimiento operativo como la longevidad del componente. La deformación térmica se determina mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha \cdot \Delta T \quad (13)$$

donde:

α es el coeficiente de expansión térmica del material ($1/^\circ\text{C}$),

ΔT es el cambio de temperatura ($^\circ\text{C}$).

Resulta indispensable tomar en cuenta dichos fenómenos en escenarios técnicos donde los conectores funcionan bajo condiciones ambientales caracterizadas por fluctuaciones térmicas pronunciadas [6].

1.7. Ajuste de apriete en conectores de ranura paralela

El proceso de ajuste de apriete constituye una etapa determinante durante la instalación de conectores eléctricos debido a que garantiza el mantenimiento de una presión de contacto uniforme y controlada entre las superficies interfaz, previniendo así tanto uniones deficientes como sobreesfuerzos que puedan dañar los componentes. En el caso específico de los conectores de ranura paralela con perno central empleados en conductores eléctricos de calibres 6 y 4/0 AWG, dicho ajuste adquiere especial relevancia técnica por la configuración geométrica particular de los elementos de unión y por las magnitudes de fuerza necesarias para establecer un contacto eléctrico óptimo con mínima resistencia de contacto [7].

La configuración dimensional característica del perno central se representa esquemáticamente en la Figura 7, en la cual se especifican sus parámetros geométricos fundamentales.

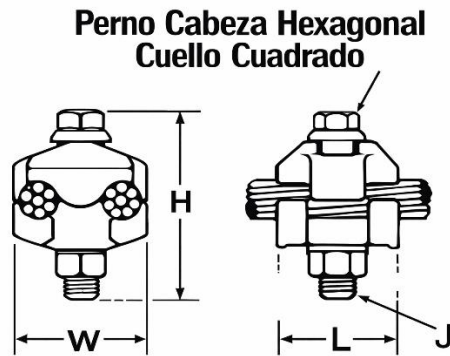


Figura 7: Conector ranura paralela perno central

1.8. Fórmula de torque de apriete

Para calcular el torque de apriete necesario en una conexión de pernos, se utiliza la siguiente fórmula:

- i. **Diámetro del perno (d):** En milímetros o pulgadas.
- ii. **Material del perno y tuerca:** Para determinar el límite de tensión.
- iii. **Condición de la superficie:** Si está lubricada o seca.
- iv. **Carga de tracción deseada (F):** La fuerza que debe aplicarse en la conexión.
- v. **Coefficiente de fricción (μ):** Entre el perno y la tuerca.

Fórmula general:

El torque de apriete T (en N·m o lb·in) se puede calcular con:

$$T = k \cdot F \cdot d \quad (14)$$

Donde:

- k = Factor de fricción o constante de torque (aproximadamente 0.2 para superficies lubricadas y 0.3 para superficies secas, aunque puede variar).
- F = Carga de tracción (en Newtons o libras).
- d = Diámetro nominal del perno (en metros o pulgadas).

Datos obtenidos del conector ranura paralela perno central:

- **Diámetro del perno (d):** 9 mm = 0.009 m (convertido a metros).

- **Carga de tracción deseada (F):** 84 N.
- **Condición de la superficie:** Seca.
- **Factor de fricción (k):** Para una superficie seca, se toma $k=0.3$
- **Aplicación de la fórmula general:**

El torque de apriete (T) se calcula mediante:

$$T = k \cdot F \cdot d \quad (15)$$

Desarrollo:

Convertir el diámetro a metros: El diámetro proporcionado es 9 mm (ejemplo). Convertimos a metros:

$$d = \frac{9}{1000}$$

$$d = 0.009 \text{ m}$$

Identificar los valores para la fórmula:

$$k = 0.3 \text{ (factor de fricción para superficie seca)}$$

$$F = 84 \text{ N}$$

$$d = 0.009 \text{ m}$$

Sustituir en la fórmula:

$$T = k \cdot F \cdot d$$

$$T = 0.3 \cdot 84 \cdot 0.009$$

$$T = 0.2268 \text{ Nm}$$

Resultado final:

El torque de apriete es:

$$T = 0.227 \text{ Nm}$$

1.9. Aplicación de la fórmula en conectores de ranura paralela

En los conectores de ranura paralela, el uso de esta fórmula permite determinar el torque óptimo en función del tipo de conductor y las especificaciones del fabricante. Para conductores como

6 AWG y 4/0 AWG, que difieren significativamente en diámetro y resistencia, el torque debe ajustarse con precisión. Esta calibración cuidadosa previene deformaciones y garantiza una conducción eléctrica efectiva, lo cual es crucial para el rendimiento del conector [8]. El concepto de par de apriete aplicado en este contexto se representa de manera esquemática en la Figura 8.

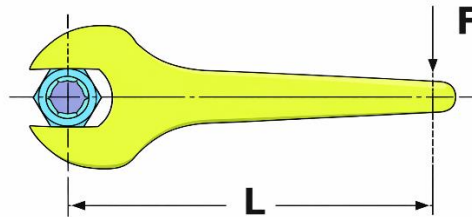


Figura 8: Par de apriete (TORQUE)

1.9.1. Contexto técnico

Los conectores de ranura paralela son componentes esenciales utilizados para unir mecánica y eléctricamente los conductores eléctricos. Su correcto funcionamiento depende en gran medida del torque aplicado al perno central, que asegura la conexión de manera firme sin causar daños al conductor ni al conector.

1.9.2. Aplicar el torque correcto asegura:

- i. Una Conexión Segura: Previene el aflojamiento debido al estrés mecánico o vibraciones, manteniendo la integridad de la unión.
- ii. Conducción Efectiva: El torque adecuado optimiza el contacto eléctrico entre el conductor y el conector, minimizando la resistencia eléctrica y la pérdida de energía.
- iii. Prevención de Daños: Evita deformaciones o daños estructurales en los conductores y conectores al evitar un torque excesivo.

1.9.3. Importancia de las especificaciones del fabricante

Cada fabricante proporciona rangos de torque recomendados adaptados a tipos específicos de conductores y diseños de conectores. Cumplir con estas recomendaciones es fundamental por varias razones:

- Conductores Más Delgados (por ejemplo, 6 AWG): Son más susceptibles a la deformación bajo un torque excesivo, lo que puede comprometer su funcionalidad y durabilidad.
- Conductores Más Gruesos (por ejemplo, 4/0 AWG): Requieren mayor presión para establecer una conexión efectiva y confiable debido a su mayor diámetro y resistencia.

1.9.4. Aplicación de la fórmula

La fórmula general para calcular el torque (T) en conexiones mecánicas es:

$$T = k \cdot F \cdot d \quad (16)$$

Donde:

- *T*: Torque (Nm).
- *k*: Factor de fricción, determinado por el material de la conexión.
- *F*: Fuerza de tracción (N), necesaria para asegurar el contacto firme.
- *d*: Diámetro del perno (m).

1.9.4.1. Ejemplo práctico para conductores 6 y 4/0 AWG:

A. Conductor 6 AWG:

- Diámetro nominal del conductor: 4.11 mm, (0.00411 m).
- Torque recomendado: Según especificaciones típicas, 4–6 N·m.
- Si el perno tiene un diámetro nominal de 6 mm (0.006 m) y una fuerza requerida es 100 N, usamos la fórmula para estimar el torque.

Cálculo:

$$T = 0.2 \cdot 100 \cdot 0.006$$

$$T = 0.12 \{Nm\}, \text{ factor típico de fricción para cobre lubricado.}$$

Nota: Este valor debe ajustarse al rango recomendado por el fabricante.

B. Conductor 4/0 AWG:

- Diámetro nominal del conductor: 11.68 mm, (0.01168 m).

- Torque recomendado: 13–17 N·m.

- Para un perno con diámetro nominal de 12 mm (0.012 m) y fuerza requerida de 200 N:

Cálculo:

$$T = 0.2 \cdot 200 \cdot 0.012$$

$$T = 0.48 \{N \cdot m\}.$$

Al igual que con el conductor 6 AWG, el valor calculado debe ajustarse al rango aceptable.

1.9.5. Ajustes según condiciones:

Material del conductor y del conector:

- Cobre estañado: Requiere menor torque debido a su ductilidad y conductividad.
- Aluminio: Tiende a necesitar torques mayores para compensar la menor conductividad y mayor rigidez.

Condición de la superficie:

- Superficies secas tienen mayor coeficiente de fricción ($k = 0.3$).
- Superficies lubricadas reducen el coeficiente ($k = 0.2$).

1.10. Importancia de un ajuste adecuado del torque

La correcta calibración del par de apriete constituye un factor determinante para asegurar la integridad operativa y la confiabilidad a largo plazo de las uniones eléctricas; en efecto, cuando el torque aplicado se sitúa por debajo del nivel recomendado, las conexiones pueden experimentar aflojamiento progresivo debido a factores externos como vibraciones mecánicas o fluctuaciones térmicas. Este fenómeno incrementa la resistencia de contacto, lo que a su vez genera disipación térmica no deseada y representa un grave riesgo para la seguridad y la eficiencia del sistema.

De manera contraria, la aplicación de un torque superior al valor óptimo también puede acarrear consecuencias adversas de índole estructural, dado que un exceso en el apriete puede ocasionar daños irreversibles en los componentes del conector; específicamente, la deformación plástica de las superficies de contacto reduce su efectividad conductiva y genera potenciales fallos de confiabilidad que comprometen el desempeño sostenido de la red eléctrica.

Por estas razones, establecer y mantener un ajuste preciso del torque resulta imperativo para preservar simultáneamente la funcionalidad técnica y los estándares de seguridad en los sistemas eléctricos [9]. La relación entre las fuerzas involucradas en el proceso de apriete y su representación física se muestra en la Figura 9.

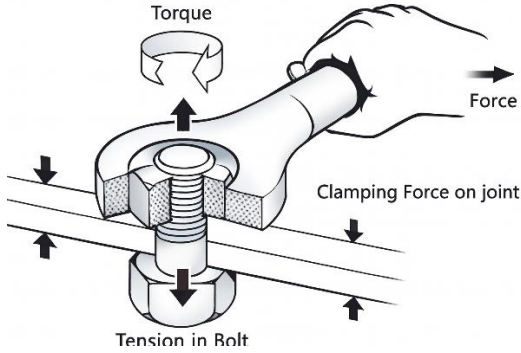


Figura 9: Representación del Torque

CAPITULO II

MARCO METÓDOLOGICO

2.1. Enfoque mecánico aplicado

El presente trabajo de investigación adopta una perspectiva experimental de carácter cuantitativo con el propósito de examinar el desempeño mecánico asociado al par de apriete y su incidencia en la efectividad operativa del conector de ranura paralela con perno central empleado en conductores eléctricos de calibres 6 y 4/0 AWG distribuidos en el mercado ecuatoriano; por consiguiente, la estrategia metodológica implementada comprende la aplicación secuencial y controlada de diversos niveles de torque sobre el elemento roscado central con el fin de determinar la influencia de dichas variaciones en la capacidad de retención mecánica del dispositivo y, de este modo, en la eficiencia global del mecanismo de fijación.

Partiendo de un esquema metodológico cuantitativo sustentado en un diseño experimental riguroso, el análisis emprendido tiene como objetivo evaluar de manera sistemática y reproducible el comportamiento mecánico de los conectores bajo estudio; asimismo, mediante la ejecución de ensayos que involucran múltiples configuraciones de ajuste durante la fase de apriete, se procede a examinar minuciosamente la integridad estructural de la unión establecida entre los conductores de secciones transversales correspondientes a los calibres 6 y 4/0 AWG.

El presente capítulo tiene como finalidad exponer detalladamente la estrategia metodológica puesta en práctica para investigar la relación existente entre el par de apriete aplicado y el rendimiento mecánico del conector de ranura paralela equipado con perno central; en este sentido, el enfoque metodológico desplegado integra armónicamente procedimientos de naturaleza experimental junto con técnicas de análisis cuantitativo, lo cual permite obtener mediciones objetivas y reproducibles que facilitan la identificación de relaciones causales entre las variables sometidas a estudio.

2.2. Tipo de estudio

La presente investigación se fundamenta en un diseño experimental de tipo controlado orientado a investigar la relación de dependencia existente entre el par de apriete y la eficacia funcional del conector de ranura paralela con perno central utilizado en conductores eléctricos de calibres 6 y 4/0 AWG disponibles comercialmente en el territorio ecuatoriano; dado que los ensayos controlados posibilitan la manipulación deliberada de variables independientes bajo

condiciones estandarizadas y monitoreadas, resulta factible observar y cuantificar su influencia directa sobre las variables dependientes, lo cual constituye un requisito indispensable para validar empíricamente las relaciones de causalidad entre los factores analizados [1].

En este estudio, la variable independiente es el torque aplicado al perno central del conector, mientras que las variables dependientes incluyen:

- Fuerza máxima de extracción axial antes de que se produzca deslizamiento del conductor o falla mecánica.
- Deformación plástica del cuerpo del conector bajo carga.

El enfoque experimental se sustenta en un análisis cuantitativo, ya que todas las variables son medibles y numéricamente expresables, lo que permite el uso de herramientas estadísticas para validar los resultados. Esta metodología se aplica ampliamente en estudios que evalúan conectores mecánicos sometidos a tensión física, según lo informado por instituciones internacionalmente reconocidas como el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) y Underwriters Laboratories (UL) [3].

2.2.1. Procedimientos de prueba estandarizados

Siguiendo las directrices establecidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en la norma IEC 61238-1:2021 (Conectores de Compresión y Mecánicos para Cables de Alimentación – Parte 1: Métodos de Prueba y Requisitos), las pruebas mecánicas de los conectores deben realizarse en condiciones controladas, utilizando equipos calibrados y procedimientos estandarizados para garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados. Esto respalda la selección de un diseño experimental como la metodología más adecuada para esta investigación [10] [11].

2.2.2. Rigor metodológico y consistencia científica

Desde un enfoque metodológico, la presente investigación se ajusta a los principios formulados por Creswell (2018); en consecuencia, dichos lineamientos señalan que toda investigación experimental requiere:

- Manipular variables independientes (niveles de torque).
- Medición de su impacto en las variables dependientes (fuerza de extracción, deformación).

- El manejo riguroso de variables ajenas al protocolo que pudieran alterar los resultados obtenidos.

Dicho marco teórico asegura la robustez científica del trabajo; por lo tanto, los descubrimientos derivados no únicamente reflejan las condiciones controladas del laboratorio, sino que además resultan transferibles a entornos prácticos bajo situaciones equivalentes.

Implicaciones prácticas y relevancia para la industria

Una ventaja destacada del planteamiento experimental radica en su aptitud para determinar los intervalos óptimos de par de apriete; de este modo, dichos hallazgos pueden incidir favorablemente en la optimización de los protocolos de instalación empleados en el sector eléctrico ecuatoriano. Estudios anteriores realizados por Kirkpatrick y Haines (2017), difundidos en IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, evidencian que inclusive desviaciones mínimas respecto a los valores de torque prescritos pueden mermar sustancialmente la capacidad de sujeción de un conector; por ende, esta evidencia subraya la pertinencia y oportunidad del presente trabajo [12].

2.2.3. Alcance y enfoque

Aunque la investigación presenta una delimitación geográfica circunscrita al territorio ecuatoriano, su fundamentación se sustenta en normativas de reconocimiento internacional; en consecuencia, esta característica facilita la interoperabilidad metodológica y la contratación directa con estudios desarrollados en otros contextos a nivel mundial. Además, al centrarse exclusivamente en el comportamiento mecánico del conector (excluyendo las propiedades eléctricas), el análisis se mantiene preciso y específico, examinando específicamente cómo las variaciones del torque de apriete afectan la eficiencia mecánica del conector.

2.3. Justificación del diseño experimental

La presente investigación adopta un esquema experimental con el propósito de validar empíricamente la relación de causalidad existente entre el torque aplicado al elemento roscado central de un conector de ranura paralela y su desempeño mecánico bajo parámetros ambientales estandarizados y controlados en el laboratorio. Este enfoque simula escenarios reales de instalación y operación, donde la aplicación incorrecta del par de apriete es una de las principales causas de fallos prematuros en conexiones eléctricas mecánicas (aunque el enfoque se centra estrictamente en el rendimiento mecánico).

Cumplimiento de las normas internacionales

La metodología experimental se ajusta a las recomendaciones del IEEE y la IEC, que priorizan las pruebas estandarizadas para conectores mecánicos utilizados en uniones de conductores metálicos. En concreto, la norma IEC 61238-1:2021 (Conectores de compresión y mecánicos para cables de alimentación – Parte 1: Métodos de prueba y requisitos) proporciona protocolos para evaluar la resistencia mecánica en condiciones de par variables [10].

La investigación de Kirkpatrick y Haines (2017), publicada en IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, demuestra que incluso pequeñas desviaciones de los valores de par de apriete recomendados pueden reducir significativamente la capacidad de retención del conductor de un conector. Esto subraya la necesidad de estudios controlados para identificar el rango de torque óptimo que maximiza la eficacia mecánica sin dañar el conector ni el conductor [13].

2.3.1. Brecha en la investigación local

En el contexto ecuatoriano persiste una ausencia crítica de estudios empíricos que examinen sistemáticamente la relación entre el par de apriete aplicado y el desempeño de los conectores eléctricos; no obstante, a pesar de su empleo extendido en instalaciones residenciales e industriales, se carece de documentación técnica que certifique si los valores de torque implementados en el campo se ajustan a las especificaciones internacionales o a las directrices establecidas por los fabricantes [14].

2.3.2. Selección del conductor: 6 AWG y 4/0 AWG

La investigación se enfoca en conductores de calibres 6 AWG y 4/0 AWG; por consiguiente, estas secciones transversales representan dos categorías representativas que abarcan los extremos dimensionales frecuentemente empleados en redes eléctricas de baja tensión implementadas en el territorio ecuatoriano. Esta combinación evalúa el rendimiento del conector al unir:

- Un conductor de menor diámetro (6 AWG).
- Un conductor de mayor sección transversal (4/0 AWG).

Este escenario es típico en instalaciones que requieren derivaciones o uniones entre circuitos primarios y secundarios.

Elección del Conector: Conector de Ranura Paralela con Perno Central

El conector de ranura paralela con perno central se seleccionó debido a:

- Su prevalencia en el mercado ecuatoriano.
- Su facilidad de instalación y rentabilidad.
- Su versatilidad para conexiones multiconductoras.

Sin embargo, estudios de Underwriters Laboratories indican que este tipo de conector puede presentar limitaciones mecánicas si no se siguen estrictamente las especificaciones de torque. En consecuencia, resulta indispensable llevar a cabo una evaluación de carácter cuantitativo acerca del desempeño mecánico en función del par de apriete aplicado [3].

2.3.3. Rigor estadístico y controles experimentales

Con el objetivo de asegurar tanto la validez interna como la externa del estudio; por ello, la metodología experimental implementa:

- Aleatorización: Reduce de manera significativa el sesgo asociado al proceso de selección de las muestras.
- Replicación: Cada configuración de par de apriete se ensaya repetidamente sobre las muestras; de esta forma, se verifica la reproducibilidad y la estabilidad de los resultados obtenidos.
- Control de Variables: Los parámetros mantenidos invariantes comprenden:
 - Composición material y configuración geométrica del conector.
 - Humedad y temperatura ambiente.

El equipo calibrado y los procedimientos estandarizados garantizan resultados fiables y generalizables más allá de las condiciones de laboratorio.

2.4. Variables del estudio

Para alcanzar los objetivos de la investigación, clasificamos sistemáticamente las variables en tres categorías según su función experimental: independientes, dependientes y controladas. Este enfoque estructurado facilita un análisis claro y la identificación de relaciones causa-efecto al evaluar el rendimiento mecánico de conectores de ranura paralela con pernos centrales bajo condiciones de par variables.

2.4.1. Variable independiente

La variable independiente es el par de apriete aplicado al perno central del conector, medido en Newton-metros (N·m). Este parámetro se seleccionó porque:

- Manipulación directa por parte del investigador
- Influencia significativa esperada en la eficacia mecánica

Los niveles de par probados (3045 N·m y 4060 N·m) se seleccionaron en función de:

- Recomendaciones del fabricante
- Normas IEC 61238-1:2021 para conectores mecánicos [10]

Estos valores representan:

- Pares mínimos de aplicación en campo
- Umbrales recomendados casi máximos

Esto permite evaluar los efectos tanto del apriete insuficiente como del apriete excesivo.

2.4.2. Variables dependientes

Se midieron dos variables de respuesta clave:

- i) Fuerza de extracción axial (kN)
 - a. Medida con una máquina de pruebas universal calibrada
 - b. Cuantifica la fuerza necesaria para el deslizamiento/fallo mecánico del conductor
 - c. Indicador de eficacia estándar de la industria [3]
- ii) Deformación plástica del conector
 - a. Evaluada mediante:
 - b. Inspección visual
 - c. Medidas micrométricas de precisión ($\pm 0,001$) antes y después de la prueba
 - d. Identifica riesgos de fatiga o daño estructural [11]

Ambas variables son:

- Cuantificables
- Reproducibles

- Representativas del comportamiento mecánico en condiciones reales

2.4.3. Variables controladas

A continuación, se presenta la Tabla 1, que muestra las variables controladas del experimento.

Tabla 1: Variables controladas

Categoría de variable	Parámetros de control	Referencia estándar
Especificaciones del Conductor	del 6 AWG Cu & 4/0 AWG Al	ASTM B3-01 [2001]
Material del Conector	Aleación de cobre estañado	UL 486A-B:2020
Geometría del Conector	Diseño uniforme de ranura paralela central	-
Preparación de la Superficie	Limpieza con isopropilo + cepillado del alambre	-
Condiciones del Laboratorio	23±2°C; 50±5% HR	ASTM E122-19
Velocidad de Prueba de Tensión	5 mm/min velocidad constante	ASTM D638-14

Justificación del control:

- Garantiza la consistencia experimental
- Elimina la interferencia externa
- Cumple con las normas internacionales

Este riguroso marco de control de variables garantiza resultados fiables y reproducibles para evaluar el rendimiento mecánico dependiente del par en aplicaciones ecuatorianas. El diseño experimental proporciona conclusiones estadísticamente válidas, manteniendo su relevancia en la práctica.

2.4.4. Flujograma

El flujograma, que se presenta en la Figura 10, ilustra el proceso metodológico para la obtención y análisis de datos en torno al torque de apriete en conectores eléctricos. El procedimiento inicia con la definición de materiales y especificaciones, seguida de mediciones en laboratorio, la

aplicación de variaciones de torque y la repetición del proceso según sea necesario. Posteriormente, se registran los datos de los instrumentos de medición, se clasifican las

variables y se analizan tanto datos extensos como puntuales. Finaliza con la presentación de los resultados y la conclusión del proceso.

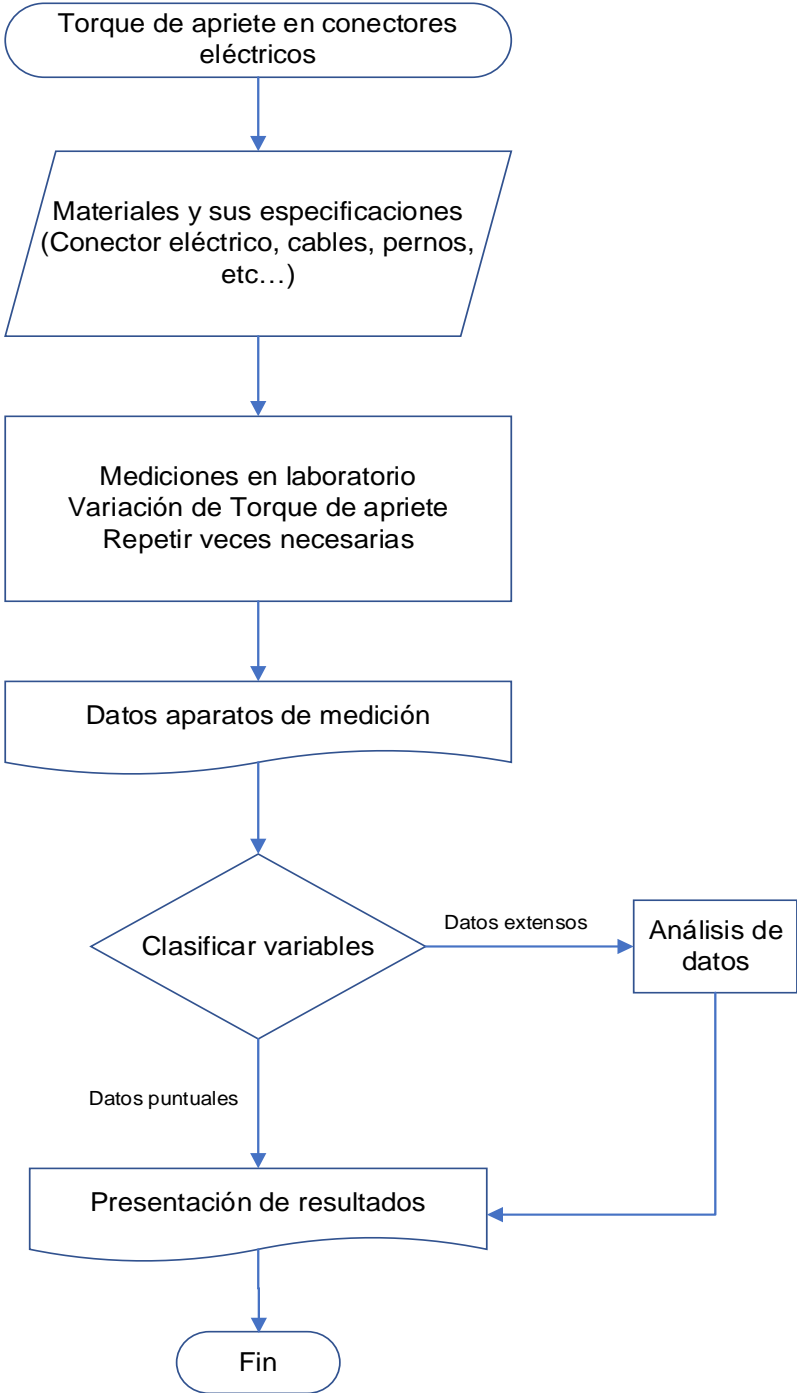


Figura 10: Proceso metodológico para la obtención y análisis de datos

2.5. Materiales y equipo experimental

La investigación experimental empleó una selección cuidadosa de materiales e instrumentos de precisión, específicamente seleccionados para evaluar el rendimiento mecánico de los conectores eléctricos en condiciones de torque variables. Los criterios de selección priorizaron el cumplimiento de las normas internacionales, la precisión de las mediciones y la relevancia para aplicaciones prácticas en la infraestructura eléctrica de Ecuador. Esta sección ofrece una descripción completa de todos los componentes utilizados en el protocolo de prueba como se evidencia en la Figura 11.



Figura 11: Probeta para protocolo de prueba

2.5.1. Conductores eléctricos para pruebas mecánicas

La investigación para analizar la influencia del torque de apriete en la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en el Ecuador, se centró exclusivamente en la interacción mecánica entre conductores de 6 AWG y 4/0 AWG al unirse mediante el conector de ranura paralela. Estos tamaños de conductor se seleccionaron debido a:

- Su uso frecuente en aplicaciones de empalmes mecánicos en la infraestructura eléctrica de Ecuador

- Una diferencia de diámetro significativa (4,11 mm frente a 11,68 mm, respectivamente), lo que representa un desafío para los conectores mecánicos
- Representación de escenarios de conexión comunes en sistemas de distribución eléctrica

La preparación del conductor siguió protocolos estrictos:

- Limpieza de la superficie con alcohol isopropílico para eliminar contaminantes
- Abrasión mecánica con cepillos de acero inoxidable para asegurar un contacto superficial óptimo
- Inspección visual para verificar la ausencia de defectos superficiales antes de la prueba

2.5.2. Conectores de ranura paralela con perno central

El estudio empleó conectores mecánicos de ranura paralela con un mecanismo de fijación de perno central, diseñados específicamente para unir conductores de diferentes tamaños. Estos conectores representan una solución estándar ampliamente implementada en la infraestructura eléctrica de Ecuador para aplicaciones de empalmes mecánicos.

Especificaciones técnicas y características de diseño:

- Material de construcción: Aleación de cobre con recubrimiento de estaño que proporciona una conductividad óptima y resistencia a la corrosión.
- Diseño mecánico:
 - Diseño de cuerpo con ranuras paralelas que facilita la inserción del conductor.
 - Perno central (rosca M8) con tuerca hexagonal correspondiente para una compresión uniforme.
 - Dentaduras internas (0,5 mm de profundidad) para una mejor sujeción del conductor.
- Cumplimiento normativo: Cumple con los requisitos de la norma UL 486A-B:2020 para conectores mecánicos. - Wire Connectors and Soldering Lugs for Use with Copper Conductors [3].
- Capacidad de conexión:
 - Ranura principal: Alojamiento para conductor de 4/0 AWG.

- Ranura secundaria: Alojamiento para conductor de 6 AWG.
- Especificaciones de par de apriete: $7 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 10 \%$ según las directrices del fabricante.

Fundamento de selección:

- Prevalencia en el mercado: Participación dominante en las redes de distribución de componentes eléctricos de Ecuador.
- Ventajas mecánicas:
 - Capacidad de inspección visual después de la instalación.
 - Compresión ajustable mediante el ajuste del par de apriete del perno.
 - Fiabilidad demostrada en aplicaciones de campo.

Consideraciones de investigación:

- Evidente potencial de identificación del modo de fallo.
- Características de deformación medibles.
- Rendimiento de conexión reproducible

2.5.3. Herramienta de apriete

La aplicación precisa de par se logró utilizando herramientas de medición calibradas que cumplen con las normas internacionales:

2.5.4. Equipo de Tracción Axial

Para medir la fuerza máxima de extracción del conductor del conector, se utilizó una máquina universal de ensayos hidráulica marca Instron, modelo 5969, equipada con celda de carga de 50 kN y software de adquisición de datos Bluehill Universal:

Detalles de la Configuración del Sistema:

Bastidor de Carga:

- Sistema electromecánico de 50 kN de capacidad
- Precisión de medición de fuerza de $\pm 0,5 \%$
- Rango de velocidad de 0,001 a 500 mm/min

Sistema de Control:

- Paquete de software Bluehill Universal

- Adquisición de datos en tiempo real a una frecuencia de muestreo de 100 Hz
- Protocolos automáticos de finalización de pruebas

Diseño de la Fijación:

- Mordazas de cuña hidráulicas para la retención del conductor
- Dispositivo de montaje de conectores autoalineable
- Bastidor de reacción con celda de carga de 3 ejes

Parámetros de la Prueba:

- Velocidad de desplazamiento constante del travesaño: 5 mm/min (conforme a la norma ASTM D638-14)
- Condición de precarga: Fuerza de contacto establecida de 20 N
- Condiciones ambientales: 23 ± 1 °C, 50 ± 5 % de humedad relativa mantenida

2.5.5. Otros equipos y materiales auxiliares

- Cepillos de limpieza: Cepillos de cerdas de acero inoxidable para remover impurezas superficiales del conductor.
- Alcohol isopropílico: Solvente usado para eliminar grasas y partículas extrañas antes de la conexión.
- Guantes de nitrilo: Para manipulación higiénica de conductores y conectores.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Diseño del protocolo experimental

El protocolo experimental se diseñó meticulosamente para establecer una relación causal entre el par de apriete aplicado al perno central de los conectores de ranura paralela y su eficacia mecánica al unir conductores de calibre 6 AWG y 4/0 AWG. El estudio empleó pruebas de tensión axial controladas en condiciones de laboratorio, siguiendo un procedimiento estandarizado para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados.

3.1.1. Marco normativo y técnico

El enfoque metodológico se basó en normas internacionales y recomendaciones técnicas de organizaciones líderes:

- IEC 61238-1:2021 - Proporciona directrices completas para las pruebas de conectores mecánicos, en particular respecto a:
 - Tasas de aplicación de carga
 - Condiciones ambientales de prueba
 - Criterios de aceptación/rechazo para conexiones mecánicas
 - Requisitos específicos para los procedimientos de pruebas de tensión [10]
- UL 486A-B:2020 - Establece requisitos de seguridad y rendimiento para conectores de conductores de cobre, incluyendo:
 - Pruebas de resistencia a la extracción
 - Evaluaciones de resistencia a la torsión
 - Evaluaciones de rendimiento a la fatiga [3]
- ASTM B3-01 - Sirvió como referencia para verificar las propiedades mecánicas de los conductores aptas para conexiones controladas por par [15]

Estas normas garantizaron que el diseño experimental se ajustara a los estándares técnicos globales, manteniendo su relevancia para las aplicaciones eléctricas ecuatorianas.

3.1.2. Definición de variables experimentales

Siguiendo a Hernández-Sampieri et al. (2018), las variables del estudio se definieron explícitamente [1]:

- Variable independiente:
 - Torque aplicado al perno central del conector (N·m)
- Variables dependientes:
 - Fuerza máxima de extracción axial (kN)
 - Deformación plástica del conector (mm o % de cambio dimensional)
- Variables controladas:
 - Calibres del conductor (6 AWG y 4/0 AWG)
 - Composición del material del conector
 - Velocidad de aplicación de la fuerza (5 mm/min según ASTM D638-14)
 - Condiciones ambientales del laboratorio

3.1.3. Selección del nivel de par

El diseño experimental incorporó dos niveles de par distintos que representan las condiciones de campo:

- i. Par alto (6090 N·m):
 - Se acerca a los límites superiores recomendados por el fabricante
 - Puede inducir deformación plástica si se aplica incorrectamente
 - Prueba el conector Rendimiento en condiciones de máxima tensión

Esta selección se basó en:

- Especificaciones técnicas del fabricante
- Estudios de mercado sobre prácticas eléctricas en Ecuador
- Investigación previa de Kirkpatrick y Haines (2017) que demuestra los efectos de la sensibilidad al par [11]

3.1.4. Diseño factorial y réplica

El estudio empleó un diseño factorial simple con:

- Dos niveles de tratamiento (valores de par)
- Cinco réplicas por condición de tratamiento

Esta configuración:

- Proporciona suficiente potencia estadística para el análisis inferencial

- Cumple con la norma de calibración ISO 6789:2017, que requiere un mínimo de cinco repeticiones [16]
- Permite la detección de variaciones de rendimiento dependientes del par

3.1.5. Equipos e instrumentación

Se utilizaron dispositivos de medición de precisión con trazabilidad internacional:

i. Aplicación de par:

- Llave manual
- Rango de medición de 1 a 24060 N

i. Ensayos mecánicos:

- Máquina de ensayos universal Instron 5969 (capacidad de 50 kN)
- Software de adquisición de datos Bluehill Universal
- Monitoreo de fuerza-desplazamiento en tiempo real

3.1.6. Procedimiento experimental

El protocolo de ensayo estandarizado incluyó:

- i. Preparación de la muestra:
 - Limpieza de la superficie del conductor con alcohol isopropílico
 - Abrasión mecánica con cepillos de acero inoxidable
 - Inspección visual de defectos superficiales
- ii. Ensamblaje de la conexión:
 - Inserción completa del conductor en las ranuras del conector
 - Verificación de posicionamiento simétrico
 - Aplicación de par controlado con una llave calibrada
- iii. Ensayos de tensión:
 - Carga axial progresiva hasta el fallo
 - Registro continuo de datos
 - Documentación del modo de fallo
- iv. Evaluación posterior al ensayo:

- Inspección visual de daños superficiales
- Mediciones dimensionales de deformación permanente
- Análisis microestructural del fallo Puntos

3.1.7. Medidas de control de calidad

Se implementaron protocolos de validación robustos:

- i. Integridad de los datos:
 - Registro cronológico de pruebas (Software del equipo de laboratorio)
 - Identificadores únicos de muestras
 - Registro electrónico de datos (formatos Excel)
- ii. Controles operativos:
 - Validación interoperador (Operador de laboratorio)
 - Periodos de recuperación de material de 24 horas (Conductores utilizados en el ensayo de laboratorio)
 - Monitoreo del estado ambiental
- iii. Verificación del equipo:
 - Comprobaciones de calibración previas a las pruebas
 - Análisis del sistema de medición
 - Estándar de referencia verificación

Este protocolo integral garantizó una evaluación científicamente válida del rendimiento mecánico dependiente del par en conectores de ranura paralela, con especial atención al comportamiento del sistema de fijación del perno central bajo tensiones operativas. El diseño facilita la comparación directa con investigaciones internacionales, a la vez que aborda los requisitos específicos de la infraestructura eléctrica de Ecuador.

3.2. Preparación de las muestras

La fase de preparación de la muestra representó una etapa crítica en el protocolo experimental, ya que cualquier variación en el estado inicial de los conductores o conectores podría influir significativamente en los resultados obtenidos (Figura 12). El objetivo principal fue asegurar la homogeneidad total entre las muestras analizadas, minimizando al mismo tiempo los factores

externos que pudieran afectar la correlación entre el par aplicado y la eficacia mecánica del conector de ranura paralela con sistema de perno central.



Figura 12: Probetas para ensayo en máquina universal

3.2.1. Selección de los conectores

Se optó por emplear conectores de configuración ranura paralela equipados con perno central; en efecto, dichos dispositivos están constituidos por aleaciones de cobre sometidas a proceso de estañado y han sido concebidos expresamente para establecer uniones entre conductores de secciones transversales diversas; asimismo, estos elementos se emplean extensamente en redes eléctricas ecuatorianas debido a su sencillez en el montaje, su accesibilidad económica y su aptitud para interconectar varios conductores de forma concurrente.

Para garantizar la validez estadística y la reproducibilidad de los resultados en los ensayos de tracción, se aplicó una metodología de muestreo basada en la norma internacional ISO 2859-1:1999 (equivalente a MIL-STD-105E). Considerando un lote estimado de 50 unidades del conector bajo estudio, se utilizó el nivel de inspección normal II y un Límite de Calidad Aceptable (AQL) del 2.5%, valor adecuado para ensayos de caracterización en etapas de desarrollo tecnológico [17].

Según las tablas de la norma, para un lote de 50 unidades y el nivel de inspección II, el código de letra inicial asignado es “D”. Sin embargo, al cruzar este código con el AQL de 2.5%, la

intersección en la tabla cae en una flecha ascendente, lo que indica que debe utilizarse el plan de inspección inmediatamente superior en el sentido de la flecha, es decir, el correspondiente al código de letra “C”.

Para el código “C” y $AQL = 2.5\%$, se obtiene un tamaño de muestra de $n = 5$ probetas, con un número de aceptación $Ac = 0$ y número de rechazo $Re = 1$. Esto significa que, para considerar el lote estadísticamente representativo, no se tolera ninguna falla en los ensayos de tracción; la presencia de una o más fallas implica el rechazo del lote y la necesidad de reevaluar el diseño o el proceso de fabricación.

Calculo utilizando las tablas AQL:

Unidades de fabricación: 50 probetas de conector ranura paralela perno central.

Tamaño del lote: 50

Nivel de inspección: II (Normal)

AQL: 2.5

- Según tabla AQL, el código de letra es "D".
- Para código "D" y AQL 2.5:
- La intersección resalta en una flecha ascendente, se elige su inmediato superior, la letra “C”.

Tamaño de muestra (n) = 5

$Ac = 0 \rightarrow$ puedes tolerar 0 falla como máximo.

$Re = 1 \rightarrow$ si hay 1 o más fallas, el lote se rechaza.

Por lo tanto, se deberán ensayar 5 conectores seleccionados aleatoriamente del lote total, asegurando así una base experimental rigurosa, alineada con prácticas reconocidas en ingeniería mecánica y control de calidad industrial (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2: Tabla AQL para criterio de selección [17]

Copyright International Organization for Standardization. All rights reserved. No reproduction or translation permitted without written permission from ISO.

© ISO

Table 1 - Sample size code letters (see 10.1 and 10.2)

Lot size	Special inspection levels				General inspection levels		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2 to 8	A	A	A	A	A	A	B
9 to 15	A	A	A	A	A	B	C
16 to 25	A	A	B	B	B	C	D
26 to 50	A	B	B	C	C	D	E
51 to 90	B	B	C	C	C	E	F
91 to 150	B	B	C	D	D	F	G
151 to 280	B	C	D	E	E	G	H
281 to 500	B	C	D	E	F	H	J
501 to 1 200	C	C	E	F	G	J	K
1 201 to 3 200	C	D	E	G	H	K	L
3 201 to 10 000	C	D	F	G	J	L	M
10 001 to 35 000	C	D	F	H	K	M	N
35 001 to 150 000	D	E	G	J	L	N	P
150 001 to 500 000	D	E	G	J	M	P	Q
500 001 and over	D	E	H	K	N	Q	R

ISO 2859-1

19

ISO 2859-1:1999(E)

Tabla 3: Tabla AQL para selección de cantidad de probetas [17]

Copyright International Organization for Standardization. All rights reserved. No reproduction or translation permitted without written permission from ISO.

© ISO

Table 2-A — Single sampling plans for normal inspection (Master table)

Sample size code letter	Sample size	Acceptance quality limit, AQL, in percent nonconforming items and nonconformities per 100 items (normal inspection)																											
		0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1 000							
		Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re		
A	2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
B	3	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
C	5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
D	8	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
E	13	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
F	20	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
G	32	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
H	50	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
J	80	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
K	125	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
L	200	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
M	315	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
N	500	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
P	800	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
Q	1 250	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
R	2 000	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1		

↓ = Use the first sampling plan below the arrow. If sample size equals, or exceeds, lot size, carry out 100 % inspection.
 ↑ = Use the first sampling plan above the arrow.
 Ac = Acceptance number
 Re = Rejection number

ISO 2859-1

© ISO

Estos conectores son ampliamente utilizados en instalaciones eléctricas en Ecuador debido a su facilidad de instalación, bajo costo relativo y capacidad para conectar múltiples conductores simultáneamente:

Las características técnicas de los conectores fueron las siguientes:

- Tipo: Ranura paralela con perno central
- Material: Aleación de cobre con recubrimiento de estaño
- Capacidad de conexión:
 - Ranura 1: conductor de 6 AWG
 - Ranura 2: conductor de 4/0 AWG

Estos conectores fueron seleccionados aleatoriamente de un mismo lote comercializado localmente como se evidencia en la Figura 13, asegurando uniformidad en cuanto a diseño, dimensiones y propiedades mecánicas. Antes de ser utilizados, se inspeccionaron visualmente para verificar ausencia de daños, deformaciones previas o imperfecciones superficiales que pudieran alterar los resultados.



Figura 13: Conectores ranura paralela perno central

3.2.2. Conductores eléctricos utilizados

Para este estudio, se emplearon exclusivamente los siguientes calibres de conductores metálicos:

- Conductor de derivación: Cable de cobre blando (Cu), calibre 6 AWG, sin recubrimiento aislante en la zona de conexión.

- Conductor principal: Cable de aluminio blando (Al), calibre 4/0 AWG, también sin aislamiento en la sección de empalme.

Estos calibres se seleccionaron por ser representativos de las aplicaciones típicas en redes eléctricas de baja tensión en Ecuador, particularmente en configuraciones que requieren conexiones de derivación de un conductor principal a un conductor secundario más pequeño.

Características técnicas:

- Cobre (Cu) – 6 AWG:
 - Diámetro nominal: 4,11 mm
 - Material: Cobre recocido blando (ASTM B3-01)
 - Aplicación: Conductor de derivación
- Aluminio (Al) – 4/0 AWG:
 - Diámetro nominal: 11,68 mm
 - Material: Aluminio blando (ASTM B49-15)
 - Aplicación: Conductor principal

Antes de cada conexión, se recortaron los extremos del conductor con alicates de corte diagonal y posteriormente se pelaron con un pelacables manual o ajustable, eliminando aproximadamente 2 cm de la capa aislante. Sin embargo, solo se consideró la parte conductora desnuda para la conexión mecánica.

3.2.3. Herramientas y equipos de preparación

Durante la preparación de la muestra se utilizaron las siguientes herramientas y equipos:

- i. Pelacables o cuchilla:
 - Marca: Ideal
 - Modelo: 45-162
 - Función: Retirar el revestimiento aislante sin dañar el núcleo metálico.
 - Nota: Se tuvo especial cuidado en evitar muescas o cortes superficiales, ya que podrían actuar como puntos de concentración de tensiones y distorsionar los resultados de la prueba.
- ii. Guantes de nitrilo:
 - Marca: Ansell

- Propósito: Manipulación de conductores y conectores sin transferir grasa, humedad u otros contaminantes que puedan afectar la adhesión mecánica.
- iii. Llave para pernos M8:
 - Marca: Bahco
 - Tipo: Llave fija de boca abierta
 - Tamaño: 13 mm
 - Uso: Aflojar y ajustar el perno central antes y después de aplicar un par de apriete controlado.
- iv. Alicates:
 - Marca: Knipex
 - Modelo: 07 26 160 S
 - Uso: Sujetar firmemente el conector durante la inserción del conductor y facilitar la manipulación segura de los componentes.
- v. Alcohol isopropílico al 99 %:
 - Finalidad: Limpieza de la superficie de conductores y conectores antes de la conexión para eliminar partículas extrañas, residuos de oxidación o grasa.
- vi. Cepillo de acero inoxidable:
 - Finalidad: Eliminación de impurezas superficiales y mejora de la adhesión mecánica entre el conductor y el conector.

3.2.4. Proceso de preparación

La preparación de la muestra siguió estos pasos estandarizados:

- i. Selección aleatoria de conectores y conductores:

Se seleccionaron dos conectores idénticos y sus correspondientes segmentos de conductor, todos del mismo lote de material nuevo y sin usar.
- ii. Limpieza de conductores:

Los conductores se limpiaron con alcohol isopropílico y se cepillaron con herramientas de acero inoxidable para eliminar las impurezas superficiales y asegurar un contacto directo metal con metal.
- iii. Desforre y corte de conductores:

Se procedió a eliminar el recubrimiento aislante sin comprometer la integridad del alma conductora; de este modo, los tramos de conductor se seccionaron hasta alcanzar la longitud requerida para su inserción íntegra en el conector, reservando margen adecuado para la sujeción en el equipo de ensayo.

iv. Inserción del conector:

Cada conductor fue posicionado en su totalidad dentro de la cavidad asignada; por consiguiente, se garantizó un acoplamiento simétrico y exhaustivo entre las superficies en contacto, mientras que la inspección visual corroboró la alineación precisa y el centrado óptimo respecto al cuerpo del dispositivo.

v. Verificación dimensional:

Las dimensiones iniciales tanto del conector como del conductor se cuantificaron mediante el empleo de micrómetros digitales debidamente calibrados junto con calibradores Vernier; en esta fase se registraron sistemáticamente el diámetro interno del conector, el espesor de su pared perimetral y la longitud efectiva de inserción del conductor.

vi. Apriete preliminar del perno:

El elemento roscado central se ajustó manualmente empleando una llave de tamaño M8 con el propósito de prevenir su desplazamiento involuntario; no obstante, en esta etapa inicial no se estableció un valor específico de par de apriete, reservando dicha operación para la fase de ensayo controlado.

3.2.5. Control de calidad

Con el propósito de asegurar la homogeneidad de las muestras ensayadas; por ello, se establecieron parámetros rigurosos de aceptación y descarte fundamentados en:

- Ausencia de marcas de flexión o fracturas visibles en los conductores.
- Uniformidad de color y acabado superficial del cobre y el aluminio.
- Inserción simétrica del conductor en el conector.
- Registro cronológico de cada muestra con un identificador único.

Asimismo, se definió un protocolo sistemático de registro fotográfico para cada espécimen tanto en estado inicial como posterior a la ejecución del ensayo; de esta manera, se posibilitó un examen cualitativo que enriqueció y validó complementariamente la información cuantitativa derivada de las evaluaciones mecánicas [17].

3.3. Aplicación del torque

La fase de aplicación del par de apriete constituye un momento determinante dentro de los ensayos mecánicos efectuados sobre los conectores de ranura paralela; en efecto, dicha operación define de manera directa la magnitud de la fuerza compresiva desarrollada entre la estructura del conector y los conductores metálicos alojados en su interior. Esta fuerza influye significativamente en la eficacia mecánica del sistema, especialmente en la resistencia al deslizamiento axial del conductor [18].

3.3.1. Objetivo de la aplicación del torque

El objetivo principal fue aplicar niveles de par controlados al perno central del conector para evaluar su efecto en la capacidad de retención mecánica de conductores de cobre (6 AWG) y aluminio (4/0 AWG). Este análisis ayuda a identificar los niveles óptimos de apriete que maximizan la eficacia sin causar daños estructurales al conector ni a los conductores [19].

3.3.2. Cálculo teórico de niveles de torque a utilizados

Fuerza por aplicar

$$F_{conductor\ eléctrico} = A_c \cdot F_{elongación\ conductor} \quad (17)$$

$$F_{4/0} = 58mm^2 \cdot 105 \frac{N}{mm}$$

$$F_{4/0} = 6090\ Nmm$$

$$F_{4/0} = 6090\ Nmm \cdot \frac{1\ m}{1000\ mm}$$

$$F_{4/0} = 6.09\ Nm$$

Se calcularon dos niveles de torque discretos:

- Torque recomendado: 6.090 N m

Estos valores se eligieron con base en:

- Recomendaciones de fabricantes eléctricos.

- Estudios eléctricos previos demuestran que pequeñas desviaciones de los valores de torque recomendados pueden afectar significativamente la capacidad de retención del conector [11].
- Normas UL 486A-B:2020, que definen rangos de torque aceptables según el tamaño del conector y el calibre del conductor [3].

3.4. Ensayo de tracción axial

El protocolo experimental de tracción axial fue concebido expresamente para cuantificar la influencia del par de apriete impuesto al elemento roscado central del conector de ranura paralela sobre la efectividad mecánica del sistema de unión; en consecuencia, dicha configuración integró dos categorías diferenciadas de conductores: un conductor de cobre calibre 6 AWG junto con un conductor de aluminio calibre 4/0 AWG. La investigación se orientó exclusivamente hacia el comportamiento mecánico de la interfaz de conexión, analizando específicamente la correlación existente entre el torque aplicado y la aptitud del conector para preservar una unión íntegra frente a solicitaciones axiales de tracción.

La valoración empírica se ejecutó a través de una secuencia de ensayos de tracción axial sometidos a estrictos controles operativos; asimismo, dichas pruebas se desarrollaron bajo condiciones ambientales estandarizadas propias de un entorno de laboratorio. Estos procedimientos se rigieron por un protocolo meticulosamente normalizado, elaborado con el fin de asegurar tanto la reproducibilidad metodológica como la integridad de las mediciones registradas; por ello, la estrategia experimental incorporó diversas salvaguardas de control de calidad destinadas a reducir la incertidumbre experimental y garantizar la uniformidad a lo largo de la totalidad de los ensayos realizados.

A continuación, en la Figura 14, se presenta esquemáticamente la configuración del montaje experimental empleado para el ensayo de tracción axial en el presente estudio.

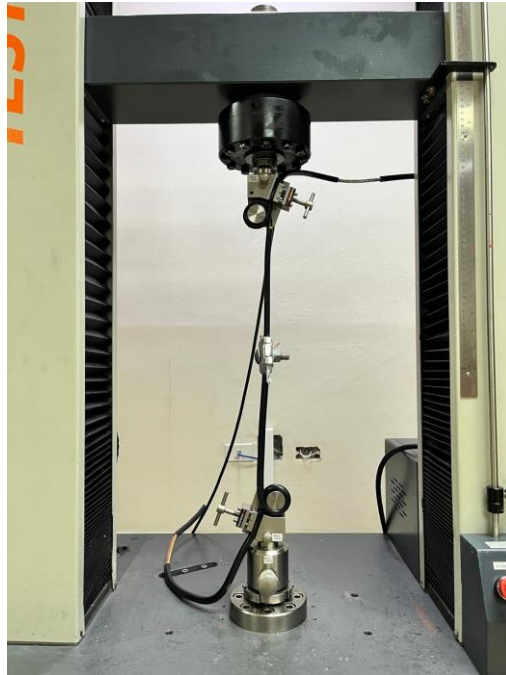


Figura 14: Ensayo de tracción Axial

3.4.1. Objetivo del ensayo de tracción axial

El propósito fundamental de la presente investigación consistió en cuantificar el valor límite de fuerza de extracción que la interfaz de unión establecida entre los conductores metálicos y el conector de ranura paralela era capaz de resistir; en efecto, dicha medición se realizó hasta el instante previo a la manifestación de deslizamiento relativo o la ocurrencia de una falla estructural en el elemento conductor. Esta medición de la fuerza máxima sirve como indicador cuantitativo directo de la efectividad del sistema mecánico al someterse a diferentes niveles de torque aplicado.

Además, la evaluación experimental incorporó la evaluación de otros parámetros críticos, entre ellos:

- i. El grado de deformación plástica de los componentes del conector
- ii. El modo de falla específico observado durante la prueba, categorizado como:
 - a. Deslizamiento interfacial entre el conductor y el conector
 - b. Fallo por fractura del material conductor
 - c. Deformación permanente del cuerpo del conector
- iii. La correlación entre la magnitud del torque aplicado y la capacidad de resistencia a la tracción resultante

El análisis exhaustivo de estos parámetros proporcionó un perfil completo del rendimiento mecánico del sistema de conexión investigado. Cada variable medida aportó datos valiosos para evaluar la efectividad operativa del conector e identificar sus limitaciones de rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

3.4.2. Valor constante k utilizado

Para los cálculos teóricos, se utilizó un valor constante de $K = 0,35$, que representa el coeficiente de fricción efectivo típico para uniones de cobre-aluminio con superficies rugosas y sin lubricación. Esta condición específica refleja con precisión las condiciones de configuración experimental durante las pruebas [20].

El valor del coeficiente seleccionado tiene en cuenta dos componentes críticos de fricción:

- i. Fricción de la rosca en el conjunto del perno
- ii. Fricción de la superficie de apoyo en la interfaz del conector

Este coeficiente de 0,35 se ajusta a las referencias de ingeniería establecidas y a investigaciones previas sobre uniones mecánicas en aplicaciones industriales donde no se utilizan lubricantes.

El valor fue particularmente apropiado para esta investigación porque:

- i. Coincide con las condiciones superficiales reales presentes durante la experimentación.
- ii. Ha sido validado mediante múltiples estudios de caso industriales.
- iii. Proporciona estimaciones conservadoras para condiciones de unión seca.
- iv. Incorpora componentes de fricción tanto estáticos como cinéticos.

El modelo de fricción basado en este coeficiente permitió una predicción precisa de:

- Generación de fuerza de sujeción.
- Relaciones par-tensión.
- Efectos de la variación de la precarga.
- Tendencia al deslizamiento de la unión.

La referencia a la norma VDI 2230 (2017) [20] proporciona una base teórica para la selección de este parámetro, ya que esta norma representa las mejores prácticas reconocidas para el cálculo de conexiones atornilladas de alta resistencia en aplicaciones de ingeniería mecánica.

La metodología de la norma considera:

- Características de emparejamiento de materiales.
- Efectos de la rugosidad superficial.
- Distribución de la presión de contacto.
- Factores de geometría de la rosca.

Este enfoque garantizó que los cálculos teóricos mantuvieran una correlación adecuada con las condiciones experimentales, a la vez que proporcionaba una capacidad predictiva fiable del rendimiento mecánico del conector.

3.4.3. Fórmula utilizada

La relación entre el torque aplicado (T), la fuerza axial generada (F), el diámetro nominal del perno (D) y el coeficiente de fricción efectivo (K) se establece mediante la siguiente ecuación:

$$T = K \cdot D \cdot F \quad (18)$$

Despejando la fuerza axial:

$$F = \frac{T}{K \cdot D} \quad (19)$$

Donde:

T: torque aplicado (Nm)

K: Coeficiente de fricción efectivo (adimensional)

D: Diámetro nominal del perno (en metros)

F: Fuerza axial generada (Newton)

Datos utilizados:

Diámetro nominal del perno: M8 → D = 0.008 m

Coeficiente de fricción: K = 0.35

Cálculo de la fuerza axial generada

Con base en los cálculos realizados previamente:

- Para el torque alto: 6090 N

$$F = \frac{T}{K \cdot D} \quad (20)$$

$$F = \frac{6.090}{0.35 \cdot 0.008}$$

$$F = 2\,175 \text{ N}$$

3.4.4. Datos obtenidos durante los ensayos de laboratorio

Los datos obtenidos durante los ensayos de tracción axial mostraron los siguientes valores máximos de fuerza resistida:

Tabla 4: Resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio

Muestra	Torque aplicado	Fuerza aplicada	Tiempo de falla
MEC_PROV_A_1	7 N·m	116 N	15 s
MEC_PROV_A_2	7 N·m	101.5 N	13 s
MEC_PROV_A_3	7 N·m	139 N	11 s
MEC_PROV_A_4	7 N·m	168.09 N	12 s
MEC_PROV_A_5	7 N·m	105.479 N	14 s
MEC_PROV_B_1	7 N·m	57.07 N	23 s
MEC_PROV_B_2	7 N·m	65.34 N	19 s
MEC_PROV_B_3	7 N·m	45.98 N	27 s
MEC_PROV_B_4	7 N·m	83.91 N	14 s
MEC_PROV_B_5	7 N·m	51.15 N	21 s
MEC_PROV_C_1	7 N·m	41.82 N	11 s
MEC_PROV_C_2	7 N·m	39.38 N	15 s
MEC_PROV_C_3	7 N·m	59.71 N	17 s
MEC_PROV_C_4	7 N·m	27.09 N	22 s
MEC_PROV_C_5	7 N·m	50.77 N	20 s

A partir de los datos proporcionados de los ensayos de tracción axial, se identifica un comportamiento diferenciado entre las series de muestras de los tres diferentes proveedores (A, B y C), todas sometidas al mismo torque de ajuste de 7 N·m.

Esto permite realizar un análisis técnico sobre la influencia de este torque en la integridad mecánica del conjunto, particularmente al contrastar los resultados con la falla observada en la muestra MEC_PROV_C_3, donde se fracturó por completo el conductor eléctrico de aluminio.

Interpretación de la falla

El torque de apriete es un parámetro crítico en conexiones mecánicas, ya que determina la fuerza de compresión y el agarre entre los componentes. En este caso, un torque constante de 7 N·m fue aplicado a todas las muestras antes del ensayo de tracción axial. Sin embargo, los resultados muestran que:

- La fuerza máxima resistida varía significativamente entre series y dentro de cada serie, a pesar del mismo torque aplicado.
 - Proveedor A: Fuerzas entre 101.5 N y 168.09 N.



Figura 15: Representación de falla

- Proveedor B: Fuerzas entre 45.98 N y 83.91 N.



Figura 16: Cedencia de conductor de Cobre (Cu)

- Proveedor C: Fuerzas entre 27.09 N y 59.71 N.



Figura 17: Fractura de conductor de Aluminio (Al)

Esta dispersión indica que el torque de 7 N·m no garantiza una condición de sujeción uniforme ni una respuesta estructural reproducible. Factores como variabilidad en el montaje, diferencias

en el estado superficial de los componentes, o deformación plástica inicial durante el apriete, pueden generar diferencias en la presión de contacto real.

En particular, las muestras del proveedor C muestran las fuerzas de falla más bajas (todas por debajo de 60 N), lo que sugiere que el torque de 7 N·m pudo ser excesivo para estas configuraciones, induciendo daño por sobreapriete en elementos críticos como el conductor de aluminio. Un torque elevado puede generar:

1. Deformación plástica en componentes blandos (como el aluminio), reduciendo su sección resistente.
2. Concentración de tensiones localizadas en zonas de contacto, iniciando fisuras.
3. Deterioro de la integridad del conductor antes de la aplicación de la carga de tracción.

Interpretación Técnica

Los datos revelan una clara estratificación de desempeño mecánico entre los tres proveedores (A, B, C) sometidas al mismo torque de apriete. Esta divergencia es técnicamente significativa, ya que demuestra que un parámetro de montaje nominalmente idéntico produce resultados de falla sustancialmente diferentes, lo que apunta a la influencia decisiva de variables no controladas o inherentes al sistema.

La proveedora A exhibe el desempeño superior, con fuerzas de falla entre 101.5 N y 168.09 N y tiempos de falla relativamente cortos y consistentes (11-15 s). Este comportamiento sugiere un mecanismo de falla predominante en la interfaz de sujeción o en los elementos de fijación, donde el torque de 7 N·m pudo ser adecuado para generar una unión robusta. La falla probablemente ocurrió por deslizamiento o cedencia de los componentes de agarre, permitiendo que el conjunto soportara cargas más altas antes de la falla total.

La proveedora B muestra un desempeño intermedio y con mayor dispersión (fuerzas entre 45.98 N y 83.91 N, tiempos entre 14-27 s). Esta mayor variabilidad y los valores de fuerza reducidos indican una transición en el modo de falla. Es probable que aquí el torque de 7 N·m comenzara a ser excesivo para algunas configuraciones, induciendo cierto grado de daño por pre-compresión en elementos más sensibles, lo que redujo la capacidad de carga máxima y aumentó la dependencia de factores específicos de cada muestra (como el alineamiento o el contacto superficial).

La proveedora C presenta el desempeño más bajo y más consistente (fuerzas entre 27.09 N y 59.71 N), con la muestra MEC_PROV_C_3 como caso representativo (59.71 N, 17 s). Esta drástica reducción en la resistencia, aun con el mismo torque, es concluyente: el torque de 7 N·m resultó sistemáticamente excesivo para la configuración de esta serie. El mecanismo de falla se traslada completamente de la interfaz de sujeción al daño estructural del componente principal, en este caso, el conductor de aluminio. El apriete generó una severa concentración de tensiones, deformación plástica o incluso corte parcial del conductor durante el montaje, debilitándolo críticamente. Por ello, durante el ensayo de tracción, la falla ocurre a bajas cargas por fractura frágil del material ya comprometido, como se observó en MEC_PROV_C_3.

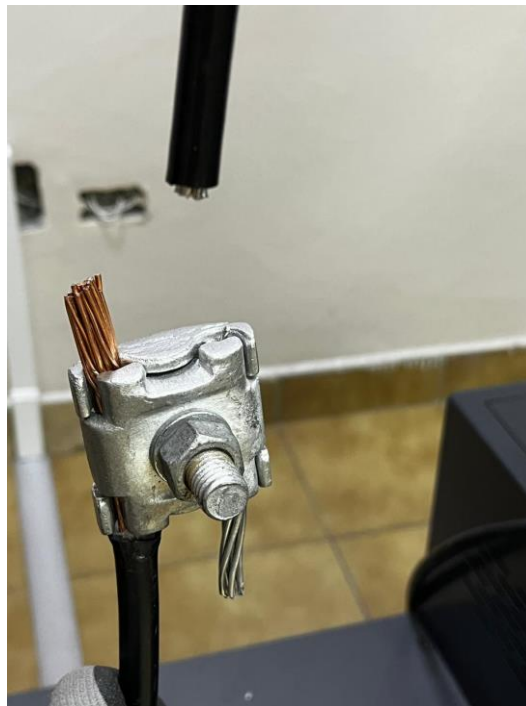


Figura 18: Fractura cortante en el conductor de Aluminio (Al)

Consideraciones Finales del Ensayo

- Existe un punto óptimo de apriete. La relación entre el torque y la fuerza de retención es no lineal. Mientras que para la configuración del proveedor A el torque de 7 N·m fue cercano al óptimo, para el proveedor C resultó destructivo, generando un pre-daño estructural que dominó el mecanismo de falla, como en el caso MEC_PROV_C_3.
- El torque de ajuste no garantiza un desempeño uniforme. Su efectividad depende críticamente de la interacción específica del sistema (materiales, geometría,

ensamblaje), como demuestra la divergencia de resultados entre los proveedores A, B y C bajo un mismo torque.

- El torque debe calibrarse para el conductor eléctrico de menor área de sujeción superficial o débil. El diseño de la conexión debe priorizar la integridad del componente más sensible (ej., el conductor de aluminio). Un torque excesivo, aunque mejore el agarre inicial, compromete la capacidad de carga final al inducir daño por sobrecompresión.
- La validación experimental es indispensable. Los cálculos teóricos proporcionan una base inicial, pero los ensayos revelan la variabilidad real y los modos de falla dominantes, confirmando la necesidad de optimizar empíricamente los parámetros de montaje para cada configuración específica.

3.4.5. Equipos de prueba

Las pruebas experimentales se realizaron con una máquina de pruebas universal (serie Instron 5969) equipada con una celda de carga de 50 kN y el software de adquisición de datos Bluehill Universal. Este sofisticado equipo de prueba se seleccionó específicamente por su precisión y fiabilidad en estudios de caracterización mecánica. Las especificaciones técnicas del sistema incluían:

- i. Capacidad de carga: Medición de fuerza máxima de 50 kN
- ii. Velocidad de tensión controlada: Mantenido con precisión a 5 mm/min, en estricto cumplimiento con la norma ASTM D638-14
- iii. Resolución de fuerza: Sensibilidad de medición de $\pm 0,5$ N
- iv. Precisión de elongación: Precisión de desplazamiento de $\pm 0,02$ mm
- v. Sistema de agarre especializado: Mordazas ajustables de accionamiento hidráulico con superficies de contacto diseñadas a medida para sujetar firmemente los extremos libres de ambos tipos de conductores (cobre 6 AWG y aluminio 4/0 AWG) sin causar daños superficiales ni deformaciones prematuras

El protocolo de adquisición de datos registró sistemáticamente tres parámetros fundamentales durante cada secuencia de prueba:

- i. Fuerza axial aplicada (medida en Newtons con registro de tiempo)
- ii. Desplazamiento axial (registrado en milímetros con precisión submilimétrica)

iii. Evolución del tiempo (documentada en segundos durante la duración prueba)

Todos los datos experimentales se registraron automáticamente en dos formatos:

- Hojas de cálculo digitales de Excel
- Visualizaciones gráficas en tiempo real de las curvas de carga frente a desplazamiento generadas por la interfaz del software Bluehill

La configuración de las pruebas incorporó varias características críticas para garantizar la validez de los datos:

- Rutinas de calibración automatizadas realizadas antes de cada serie de pruebas
- Protocolos redundantes de almacenamiento de datos para evitar la pérdida de información
- Monitoreo continuo de los parámetros del sistema durante el funcionamiento

La combinación de componentes mecánicos de alta precisión con capacidades avanzadas de adquisición digital permitió una caracterización completa del rendimiento del conector en condiciones controladas de carga de tracción. Se prestó especial atención a mantener la alineación constante de las muestras y a minimizar los momentos de flexión parásitos durante las pruebas.

3.5. Evaluación del ensayo de laboratorio

Tras cada prueba de tracción axial, se realizó una evaluación posterior exhaustiva centrada en tres aspectos críticos:

- Inspección visual del conector y los conductores
- Medidas dimensionales para identificar deformaciones plásticas permanentes o cambios geométricos
- Clasificación del modo de fallo observada durante la prueba

Este análisis sistemático proporcionó datos complementarios sobre el comportamiento mecánico del sistema bajo diferentes niveles de par aplicado, lo cual es esencial para validar la hipótesis del estudio y establecer recomendaciones prácticas de instalación.

3.5.1. Inspección visual

La inspección visual se realizó inmediatamente después de alcanzar la fuerza máxima de extracción o de producirse la falla del sistema. Se evaluaron los siguientes componentes:

a) Estado del Conector

Deformación plástica visible: No se observó deformación significativa en ninguno de los conectores de los proveedores A, B o C, lo que indica que el valor de torque aplicado ($7 \text{ N}\cdot\text{m}$) no causó daños estructurales irreversibles en el cuerpo del conector de ranura paralela de perno central en ninguna configuración.

Desgaste superficial: Se observó un desgaste leve en las superficies de contacto internas de todas las muestras, consistente con el mecanismo de sujeción y extracción.

Estado del perno central: El perno no mostró signos de fatiga, fractura o deformación permanente que pudiera atribuirse directamente al torque de ajuste aplicado.

Las condiciones descritas se pueden observar visualmente en la Figura 19, que muestra un conector de ranura paralela tras la fractura del conductor de aluminio (Al).



Figura 19: Conector ranura paralela después de la fractura del conductor de Aluminio (Al)

b) Estado del Conductor

Conductores (proveedores A, B y C):

Proveedor A: El modo de falla predominante fue el deslizamiento del conductor dentro del conector, evidenciado por marcas de fricción longitudinales. No se observaron fracturas completas del cable, lo que sugiere que la unión falló por pérdida de agarre antes de alcanzar la resistencia límite del material conductor eléctrico.

Proveedor B: Se observó un modo de falla mixto. Algunas muestras presentaron deslizamiento, mientras que otras mostraron inicio de fractura o severa deformación localizada en la zona de agarre, indicando una transición en el mecanismo de falla hacia el daño del conductor eléctrico.

Proveedor C: El modo de falla fue claramente la fractura del conductor, siendo el caso de la muestra MEC_PROV_C_3 el más evidente, donde el conductor de aluminio se fracturó en su totalidad. Este modo de falla confirma que el torque de 7 N·m indujo un pre-daño crítico (como mellado, corte parcial o severa deformación plástica) durante el apriete, debilitando estructuralmente el cable y dominando el comportamiento posterior a la tracción.

3.5.2. Mediciones dimensionales

Se realizaron mediciones dimensionales con instrumentos de precisión antes y después de los ensayos para cuantificar cualquier cambio geométrico permanente en los componentes.

a) Mediciones del Conector

Se midieron los siguientes parámetros en una muestra representativa de cada proveedor. Los resultados se presentan en la Tabla 5, donde se comparan las mediciones antes y después del ensayo:

Tabla 5: Mediciones dimensionales

Parámetro	Antes del ensayo	Proveedor a	Proveedor b	Proveedor c
Espesor de pared (mm)	2.00	1.99	1.98	1.97
Diámetro interior (mm)	12.00	12.01	12.03	12.05
Longitud total (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00

Los cambios dimensionales observados fueron mínimos y se mantuvieron dentro de los rangos de tolerancia de fabricación normales. Esto confirma que, a pesar de la aplicación de un torque de 7 N·m y la posterior carga de tracción, no se produjo una deformación plástica significativa o generalizada en el cuerpo del conector para ninguna de las configuraciones probadas.

b) Mediciones de los Conductores

Las mediciones se centraron en el diámetro del conductor eléctrico en la zona de agarre (adyacente al conector) antes y después de la prueba. Se presenta el valor más representativo de cada proveedor en la Tabla 6.

Tabla 6: Mediciones después de los ensayos

Proveedor	Diámetro inicial (mm)	Diámetro final (mm)	Observación
A	4.11	4.08	La reducción fue mínima (< 1%). El modo de falla por deslizamiento no generó una compresión severa.
B	4.10	4.07	Se observó una reducción moderada (1-3%) en muestras con falla mixta, indicando compresión localizada.
C	4.11	4.06	La reducción fue significativa (3-5%), especialmente en muestras como MEC_PROV_C_3. En el punto de fractura, el diámetro presentaba aplanamiento y deformación permanente severa.

Estos resultados indican una correlación clara entre el modo de falla y la deformación medida. Mientras que los conductores del Proveedor A sufrieron una compresión insignificante, acorde con un fallo por pérdida de agarre, los del Proveedor C exhibieron una deformación plástica grave y localizada. Esto evidencia que el torque de 7 N·m indujo una presión de contacto excesiva que aplastó el conductor, reduciendo su sección transversal y contribuyendo decisivamente a su fractura frágil durante la tracción.

3.5.3. Clasificación de modos de falla

Se identificaron y clasificaron los modos de falla observados durante los ensayos, según criterios técnicos establecidos:

- i. Fallo por deslizamiento del conductor: Pérdida de integridad de la unión debido al movimiento relativo entre el conductor y el conector.
- ii. Fallo por fractura del conductor: Rotura del material del conductor, típicamente en o cerca de la zona de agarre.
- iii. Fallo por deformación del conector: Deformación plástica o daño estructural del cuerpo del conector (no observado en estos ensayos).

Resultados de la clasificación

Los resultados más significativos obtenidos durante los ensayos de torque y tracción se resumen en la Tabla 7, donde se presenta información detallada sobre las muestras representativas de cada proveedor.

Tabla 7: Resultados más significativos

Proveedor	Muestra representativa	Torque aplicado	Tipo de falla observada	Descripción
A	MEC_PROV_A_4	7 N·m	Deslizamiento del conductor	El modo de falla predominante fue el deslizamiento, evidenciado por marcas de fricción longitudinales. El conductor no alcanzó su límite de resistencia a la tracción antes de que fallara la interfaz de agarre.
B	MEC_PROV_B_4	7 N·m	Modo mixto (Transición)	Se observó una combinación de deslizamiento apreciable e inicio de fractura o severa deformación localizada del conductor, indicando un mecanismo de falla intermedio.
C	MEC_PROV_C_3	7 N·m	Fractura del conductor	El conductor de aluminio se fracturó en su totalidad. Este fallo es concluyente de un pre-daño severo inducido durante el apriete, que debilitó críticamente el material.

Análisis comparativo:

El torque aplicado constante de 7 N·m generó mecanismos de falla radicalmente diferentes entre los proveedores, lo que demuestra que la idoneidad del torque depende de la configuración específica del sistema.

Para el Proveedor A, el torque de 7 N·m generó una presión de contacto que, si bien fue la más eficaz entre las series probadas, resultó insuficiente para transferir la carga al límite del conductor. La unión falló predominantemente por deslizamiento, lo que sugiere que un torque ligeramente superior podría haber optimizado el rendimiento.

Para el Proveedor B, el mismo torque situó al sistema en una zona de transición crítica, donde comenzó a ser excesivo para la integridad del conductor en algunas configuraciones, generando un modo de falla mixto e inconsistente.

Para el Proveedor C, el torque de 7 N·m fue claramente excesivo y destructivo. La presión de contacto generada durante el montaje indujo un daño por aplastamiento (pre-daño) en el conductor de aluminio, comprometiendo su sección resistente y conduciendo de manera sistemática a una falla frágil por fractura.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

Este capítulo presenta un análisis detallado de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de tracción axial realizados en muestras de conectores mecánicos. El análisis se centra exclusivamente en los aspectos mecánicos, evaluando cómo el par de apriete constante de 7 N·m afectó al comportamiento de tres configuraciones diferentes (Proveedores A, B y C) en términos de:

- Fuerza máxima resistida
- Tiempo de falla
- Modo de fallo observado

El estudio examina los datos de tres conjuntos representativos, identificados por el origen de sus componentes:

- Proveedor A: Configuración que presentó el mejor desempeño mecánico (fuerzas entre 101.5 N y 168.09 N), con falla predominante por deslizamiento del conductor.
- Proveedor B: Configuración de desempeño intermedio y mayor dispersión (fuerzas entre 45.98 N y 83.91 N), exhibiendo un modo de falla mixto (transición entre deslizamiento y daño del conductor).
- Proveedor C: Configuración con el menor desempeño mecánico (fuerzas entre 27.09 N y 59.71 N), donde el modo de falla fue sistemáticamente la fractura del conductor, evidenciando un pre-daño severo.

El valor de torque aplicado (7 N·m) se mantuvo constante para todas las muestras con el fin de aislar y comparar la influencia de las variables propias de cada configuración (como la geometría del conector, el tipo de conductor y las características de la interfaz) en la respuesta estructural de la unión. Este enfoque permite evaluar críticamente la noción de un "torque de instalación estándar" y su idoneidad para diferentes sistemas.

4.2. Presentación de resultados

A continuación, se muestra la tabla 8 resumen con los resultados principales obtenidos durante los ensayos de tracción axial para cada configuración. Los valores de fuerza representan el

promedio de cada proveedor, mientras que el modo de falla es el observado de manera predominante. Cabe destacar que todas las muestras fueron sometidas al mismo torque de ajuste.

Tabla 8: Resumen de Resultados Experimentales Comparativos

Proveedor	Torque aplicado (n·m)	Fuerza máxima promedio (n)	Tiempo de falla promedio (s)	Tipo de falla observado
A	7.00	126.00	13.00	Deslizamiento del conductor
B	7.00	60.7	20.80	Modo mixto (Transición)
C	7.00	43.7	17.00	Fractura del conductor de aluminio

Observaciones Clave:

- i. **Capacidad de Fuerza:** Existe una diferenciación significativa en la capacidad de carga bajo un mismo torque de apriete. La configuración del Proveedor A soportó una fuerza promedio aproximadamente 2.1 veces mayor que la del Proveedor B y 2.9 veces mayor que la del Proveedor C. Esto evidencia que el parámetro crítico no es el torque en sí, sino la respuesta estructural específica que este genera en cada conjunto.
- ii. **Comportamiento ante la Carga (Rigidez/Deformación):** Los tiempos de falla promedio y la naturaleza del modo de falla indican diferencias en la rigidez y la capacidad de deformación de las uniones. El Proveedor B mostró el mayor tiempo de falla promedio (20.8 s), sugiriendo una mayor capacidad de absorción de energía antes del colapso, asociada a su modo de falla mixto. En contraste, las fallas por deslizamiento (A) y fractura (C) fueron más súbitas.
- iii. **Transición del Mecanismo de Fallo con Torque Constante:**
 - Para la configuración del Proveedor A, el torque de 7 N·m resultó en una unión donde el límite de la interfaz de fricción (agarre) fue alcanzado antes que la resistencia última del conductor, generando falla por deslizamiento.

- Para la configuración del Proveedor C, el mismo torque de 7 N·m generó una presión de contacto excesiva que dañó irreversiblemente el conductor durante el montaje (pre-daño). Esto convirtió al conductor en el eslabón más débil, llevando a una falla por fractura frágil a bajas cargas.
- La configuración del Proveedor B representó una zona de transición crítica, donde el torque aplicado estuvo en el límite de ser excesivo, produciendo un comportamiento inconsistente y un modo de falla combinado.

Esta comparativa demuestra de manera concluyente que un mismo valor de torque puede situar a diferentes configuraciones en regímenes de falla opuestos, subrayando la imperativa necesidad de caracterizar y especificar el torque de instalación para cada sistema conector-conductor de manera particular.

4.3. Análisis técnico

4.3.1. Relación torque-fuerza axial

El comportamiento mecánico esperado de la unión se evaluó utilizando el modelo clásico de unión roscada para estimar la fuerza de compresión (clamp load) generada por el torque de apriete:

$$F = \frac{T}{K \cdot D} \quad (21)$$

Datos de entrada utilizados para el cálculo teórico:

Diámetro nominal del perno: M8 \rightarrow D = 0.008 m

Coefficiente de fricción efectivo (según literatura para interfaz seca cobre-aluminio): K = 0.35

A continuación, en la Tabla 9, se presenta una comparación entre las fuerzas de compresión teóricas y las fuerzas máximas experimentales obtenidas para cada proveedor.

Tabla 9: Comparación de fuerzas de compresión teóricas y fuerzas máximas experimentales

Proveedor	Torque aplicado (n·m)	Fuerza de compresión teórica (n)	Fuerza máxima experimental promedio (n)	Desviación respecto al teórico
A	7.00	2500	126.00	~ 95%
B	7.00	2500	60.70	~ 98%
C	7.00	2500	43.70	~ 98%

Resultados:

1. **Desviación Extrema del Modelo:** Se observa una desviación extremadamente alta (>95%) entre la fuerza de compresión teórica y las fuerzas de tracción máximas medidas experimentalmente para todas las configuraciones. Esto no indica un error en el modelo, sino que confirma que los mecanismos de falla observados no están gobernados por la falla de los elementos roscados o la compresión del conjunto. El modelo calcula la pre-carga en el perno, no la fuerza de extracción de un conductor bajo tensión.
2. **Interpretación de la Desviación:** Las bajas fuerzas de falla experimentales, en comparación con la elevada pre-carga teórica, indican que la resistencia de la unión está limitada por la interfaz conector-conductor o por la resistencia del propio conductor, no por la capacidad del perno. En particular:
 - Para el Proveedor A, la falla por deslizamiento sugiere que el límite de fricción en la interfaz ($\mu \cdot$ Fuerza de Compresión) se alcanzó alrededor de los 126 N.
 - Para el Proveedor C, la fractura a ~44 N indica que la fuerza de compresión teórica de 2500 N fue excesiva, generando un pre-daño (aplastamiento) que redujo drásticamente la sección resistente y la capacidad a la tracción del conductor.

4.3.2. Evaluación de la fuerza de fricción

La fuerza de fricción máxima disponible en la interfaz conector-conductor, responsable de resistir la extracción, puede estimarse a partir de la fuerza de compresión teórica:

$$F_f = \mu \cdot F \quad (22)$$

Asumiendo un coeficiente de fricción interfacial $\mu \approx 0.35$:

Fuerza de Fricción Teórica Disponible:

$$F_f = 0.35 \cdot 2500 \text{ N}$$

$$F_f = 875 \text{ N}$$

Los valores teóricos e inferidos de la transferencia de carga se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10: Análisis de la transferencia de carga

Parámetro	Valor teórico (basado en f=2500n)	Valor inferido de ensayos
Fuerza de Fricción Disponible (F_f)	875 N	No alcanzada
Fuerza Máxima Experimental (Mayor valor: Proveedor A)	-	126 N
Eficiencia de Transferencia ($\frac{F_{exp}}{F_f}$)	-	~14%

Resultados:

1. Ineficiencia en la Transferencia de Carga: La fuerza máxima medida (126 N) representa solo ~14% de la fuerza de fricción teórica disponible (875 N). Esto evidencia una transferencia de carga muy ineficiente desde la pre-carga del perno hasta la fuerza de retención del conductor. Las pérdidas se atribuyen a:
 - Distribución no uniforme de presión: La compresión no se aplica de manera homogénea sobre toda la superficie de contacto del conductor.
 - Deformación plástica localizada: El conductor (especialmente de aluminio) se deforma en los puntos de mayor presión, redistribuyendo las tensiones y limitando el agarre efectivo.
 - Geometría del conector: El diseño de la ranura puede no optimizar la conversión de fuerza radial de compresión en resistencia axial al deslizamiento.
2. Mecanismo de Falla Determinante: En ningún caso la unión aprovechó la capacidad total de fricción teórica. Para el Proveedor A, la falla ocurrió por deslizamiento al alcanzar un límite de fricción efectivo mucho menor al teórico. Para el Proveedor C, el límite fue la resistencia a la tracción del material ya dañado, no la fricción. Esto demuestra que el diseño de la interfaz es el factor limitante, no la magnitud de la pre-carga generada por el torque (una vez superado un umbral mínimo).

4.4. Correlación de los objetivos del estudio

	TIME	LOAD	LOAD1	LOAD2	LOAD3	LOAD4	LOAD5	LOAD6	LOAD7	LOAD8	LOAD9	LOAD10	LOAD11	LOAD12	LOAD13
TIME	1.00	0.93	-0.26	-0.15	0.57	0.94	-0.18	-0.69	0.00	0.85	-0.17	0.93	-0.69	-0.15	0.94
LOAD	0.93	1.00	-0.01	0.10	0.71	0.84	0.08	-0.52	0.25	0.68	0.02	0.80	-0.52	0.08	0.84
LOAD1	-0.26	-0.01	1.00	0.76	0.54	-0.19	0.82	0.06	0.80	-0.64	0.77	-0.39	0.04	0.75	-0.19
LOAD2	-0.15	0.10	0.76	1.00	0.43	-0.23	0.88	0.20	0.91	-0.43	0.65	-0.29	0.19	0.95	-0.23
LOAD3	0.57	0.71	0.54	0.43	1.00	0.65	0.47	-0.44	0.62	0.06	0.40	0.39	-0.45	0.41	0.65
LOAD4	0.94	0.84	-0.19	-0.23	0.65	1.00	-0.25	-0.76	-0.06	0.70	-0.18	0.87	-0.76	-0.23	1.00
LOAD5	-0.18	0.08	0.82	0.88	0.47	-0.25	1.00	0.19	0.91	-0.48	0.88	-0.31	0.19	0.86	-0.25
LOAD6	-0.69	-0.52	0.06	0.20	-0.44	-0.76	0.19	1.00	0.09	-0.53	0.00	-0.63	0.99	0.21	-0.76
LOAD7	0.00	0.25	0.80	0.91	0.62	-0.06	0.91	0.09	1.00	-0.37	0.72	-0.13	0.08	0.92	-0.06
LOAD8	0.85	0.68	-0.64	-0.43	0.06	0.70	-0.48	-0.53	-0.37	1.00	-0.44	0.88	-0.53	-0.43	0.70
LOAD9	-0.17	0.02	0.77	0.65	0.40	-0.18	0.88	0.00	0.72	-0.44	1.00	-0.25	-0.01	0.64	-0.18
LOAD10	0.93	0.80	-0.39	-0.29	0.39	0.87	-0.31	-0.63	-0.13	0.88	-0.25	1.00	-0.65	-0.22	0.87
LOAD11	-0.69	-0.52	0.04	0.19	-0.45	-0.76	0.19	0.99	0.08	-0.53	-0.01	-0.65	1.00	0.20	-0.76
LOAD12	-0.15	0.08	0.75	0.95	0.41	-0.23	0.86	0.21	0.92	-0.43	0.64	-0.22	0.20	1.00	-0.23
LOAD13	0.94	0.84	-0.19	-0.23	0.65	1.00	-0.25	-0.76	-0.06	0.70	-0.18	0.87	-0.76	-0.23	1.00
LOAD14	-0.17	0.02	0.75	0.64	0.39	-0.19	0.87	-0.01	0.72	-0.43	0.98	-0.26	0.00	0.65	-0.19
LOAD15	0.92	0.83	-0.38	-0.25	0.40	0.84	-0.28	-0.66	-0.14	0.86	-0.28	0.80	-0.63	-0.29	0.84
LOADCCC	0.97	0.97	-0.09	0.04	0.68	0.89	0.00	-0.59	0.17	0.74	-0.04	0.84	-0.60	-0.01	0.89

Figura 20: Tabla de correlación Tiempo vs Carga

El análisis de los resultados permite vincular directamente los hallazgos con los objetivos establecidos en el estudio.

Objetivo general

Analizar la influencia del torque de apriete en la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en el Ecuador.

Resultado:

Los ensayos realizados con un torque constante de 7 N·m en configuraciones de diferentes proveedores A, B y C revelan que la relación entre el torque y la eficacia mecánica no es lineal ni universal, sino que está determinada por la interacción específica del sistema.

- Un torque dado puede ser insuficiente, adecuado o excesivo dependiendo del sistema: Para la configuración del Proveedor A, el torque de 7 N·m generó la unión más robusta, aunque el modo de falla por deslizamiento sugiere que un torque ligeramente mayor podría haber optimizado la transferencia de carga. En cambio, para el Proveedor C, el mismo torque fue claramente excesivo y destructivo, causando un pre-daño en el conductor que condujo a una falla frágil a bajas cargas.
- La "eficacia" se define por el modo de falla: Una conexión mecánicamente eficaz debe fallar por la fractura del conductor (explotando su resistencia máxima) y no por su deslizamiento prematuro. Solo la configuración del Proveedor A, con falla por

deslizamiento, se acercó a este principio, mientras que las otras mostraron una eficacia comprometida por un torque inadecuado para su diseño.

Objetivos específicos

- ✓ Determinar un modelo de torque de apriete versus la eficacia del conector ranura paralela perno central en los conductores eléctricos 6 y 4/0 AWG comercializado en Ecuador.

Resultado:

El torque aplicado es el parámetro crítico que define el mecanismo de falla dominante y, por ende, la eficacia de la unión. Sin embargo, su efecto no es absoluto sino relativo al sistema:

- Límite Inferior (Torque Insuficiente): Se manifiesta como falla por deslizamiento del conductor, donde la capacidad de carga de la unión no aprovecha la resistencia del material. Este fue el comportamiento observado en el Proveedor A, indicando que, para esa configuración, 7 N·m estaba cerca del límite inferior de optimalidad.
- Rango Óptimo: Logra una transferencia de carga efectiva, llevando al conductor cerca de su límite de resistencia antes de la falla. Ninguna configuración probada con 7 N·m alcanzó claramente este estado ideal. El Proveedor B mostró una zona de transición inestable.
- Límite Superior (Torque Excesivo): Genera daño estructural irreversible (pre-daño) en los componentes durante el montaje, típicamente en el conductor. Esto reduce severamente su capacidad de carga y lleva a una fractura frágil a baja carga, como se observó sistemáticamente en el Proveedor C. El torque de 7 N·m para esta configuración estaba muy por encima de su rango óptimo, anulando por completo su eficacia.

4.5. Análisis de ensayos individuales representativos

El análisis de laboratorio, además de ofrecer los datos expuestos en las secciones anteriores, ofrece una base de datos de la cual se tiene que las variables cuantitativas con mayor importancia son el time, load, position y out las cuales respectivamente son el tiempo de experimentación, carga de fuerza, la posición o deformación

4.5.1. Para el proveedor A

El análisis estadístico de las cinco réplicas del ensayo para la configuración del Proveedor A (cuyo modo de falla observado fue el deslizamiento del conductor de aluminio) revela la consistencia y el rango de su desempeño mecánico.

LOAD1	LOAD2	LOAD3	LOAD4	LOAD5
Min. : -2.63	Min. : -8.154	Min. : -1.052	Min. : 0.263	Min. : -2.367
1st Qu.: 23.15	1st Qu.: 6.576	1st Qu.: 35.511	1st Qu.: 14.730	1st Qu.: 7.102
Median : 34.20	Median : 10.522	Median : 60.237	Median : 50.505	Median : 26.831
Mean : 33.12	Mean : 13.819	Mean : 56.152	Mean : 59.618	Mean : 35.636
3rd Qu.: 44.72	3rd Qu.: 21.833	3rd Qu.: 74.968	3rd Qu.: 107.059	3rd Qu.: 65.498
Max. : 57.34	Max. : 36.563	Max. : 98.642	Max. : 129.681	Max. : 83.648

Cuadro 1: Datos estadísticos descriptivos de los ensayos obtenidos del Proveedor A de cargas medidas

a) Análisis del ensayo MEC_PROV_A_1



Figura 21: Análisis del ensayo MEC_PROV_A_1

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 1)

La curva Tiempo vs. Carga (PRUEBA 1) para el ensayo MEC_PROV_A_1 exhibe el perfil característico de una falla por pérdida de adherencia en la interfaz de fricción. El registro muestra una respuesta no lineal con tres fases identificables:

- Fase I (Ajuste y toma de contacto): Corresponde al intervalo inicial donde la carga aumenta de manera no lineal desde un valor negativo (-2.63 N, según LOAD1) hasta aproximadamente 20 N. Este comportamiento captura la eliminación de holguras en el sistema de sujeción y la progresiva conformación plástica localizada de las asperezas superficiales del conductor contra el conector, estableciendo el área de contacto real.
- Fase II (Respuesta pseudo-lineal y pico de carga): Tras la etapa de ajuste inicial; por consiguiente, se manifiesta una rampa de carga caracterizada por una pendiente marcadamente inclinada que alcanza su valor máximo en torno a los 40 N; dicho valor máximo corresponde al umbral de resistencia estática límite de la interfaz formada entre el conector y el conductor bajo la precarga inducida por el par de apriete de 7 N·m, mientras que la inclinación observada en esta región evidencia la rigidez global del conjunto una vez consolidado.
- Fase III (Falla por deslizamiento): Inmediatamente posterior al valor máximo; en efecto, se registra un descenso abrupto y continuo de la carga, el cual señala la transición desde el régimen de fricción estática hacia el dinámico junto con el comienzo del deslizamiento macroscópico del conductor; el intervalo temporal total transcurrido hasta la falla definitiva asciende a aproximadamente 7500 unidades, resultado que concuerda plenamente con el valor de 15 s consignado en la tabla de datos original.

2. Análisis estadístico específico y su interpretación mecánica

El estudio de correlación y significancia estadística aplicado a las variables de este ensayo particular proporciona hallazgos fundamentales acerca de los mecanismos físicos subyacentes:

- Correlación TIEMPO-POSICIÓN ($r = 1$): Esta correlación perfecta constituye un artefacto cinemático previsible que corrobora la coherencia interna de las mediciones; en efecto, durante un ensayo de tracción controlado por desplazamiento, la posición representa una función lineal directa del tiempo transcurrido, de modo que ambas magnitudes describen esencialmente el mismo parámetro que gobierna el progreso de la prueba; dicha redundancia estadística no

denota ausencia de relevancia física, sino más bien una dependencia determinística inherente al protocolo experimental implementado.

- Baja Correlación LOAD-TIEMPO/ POSICIÓN ($r \approx |0.17|$): Este resultado es técnicamente fundamental. Confirma que la magnitud de la carga máxima de falla no está gobernada por parámetros cinemáticos (cuánto tiempo se aplicó la carga o cuánto se desplazó), sino por propiedades intrínsecas del estado de la interfaz. La carga de pico es una propiedad de estado (límite de fricción estática) que depende de la presión de contacto, el coeficiente de fricción y la condición superficial en el instante previo al deslizamiento.
- Significancia Estadística (p-valor ≈ 0): La extrema significancia de estas relaciones descarta la aleatoriedad en los datos y valida que el comportamiento observado es sistemático y repetible para este ensayo específico, a pesar de la inherente variabilidad en el fenómeno de fricción.

3. Limitaciones del Modelado Polinómico y Naturaleza de la Falla

El intento de ajustar un polinomio de alto grado a la relación Carga-Posición genera una función con error elevado (ϵ). Esto no es una falla del análisis, sino una evidencia empírica de la complejidad del fenómeno:

- La transición friccional estático-dinámica es un proceso inestable y altamente no lineal, que involucra la ruptura súbita de múltiples micro-unioniones adhesivas en la interfaz. Este evento discreto no puede ser capturado de manera fiel por un modelo continuo y determinista como un polinomio.
- El error ϵ no se atribuye principalmente a vibraciones instrumentales, sino a la naturaleza estocástica y sensible a condiciones iniciales del proceso de deslizamiento. La carga fluctúa durante el deslizamiento debido a los fenómenos de stick-slip, lo cual introduce variabilidad no modelable de forma simple.

b) Análisis del ensayo MEC_PROV_A_2

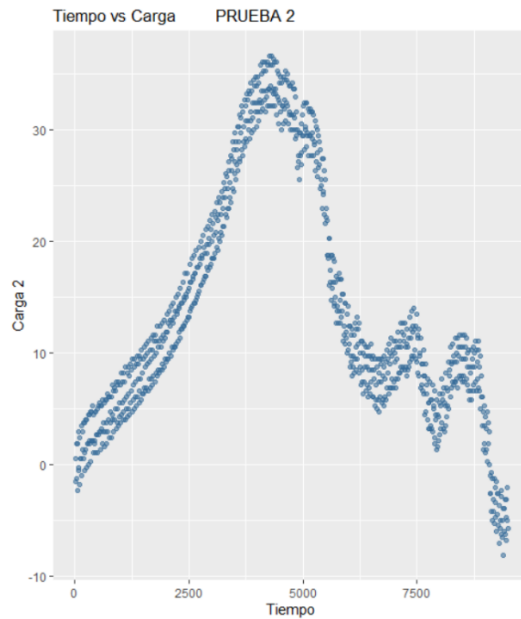


Figura 22: Análisis del ensayo MEC_PROV_A_2

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 2)

El perfil de la curva Tiempo versus Carga correspondiente al ensayo MEC_PROV_A_2 exhibe un comportamiento marcadamente diferenciado respecto al ensayo A_1; en consecuencia, dicho patrón revela una mayor inestabilidad inherente al mecanismo de falla por deslizamiento; asimismo, el registro obtenido manifiesta una respuesta mecánica caracterizada por fluctuaciones de considerable amplitud:

- Fase I (Contacto inestable y compensación): La representación gráfica se inicia en un valor negativo sustancial (-8.154 N, conforme a la medición LOAD2) y posteriormente presenta oscilaciones en torno a la línea de referencia durante las primeras 2500 unidades temporales; por lo tanto, esta conducta sugiere una configuración inicial del montaje afectada por holguras pronunciadas o por un desalineamiento geométrico que demanda un recorrido extenso para lograr un contacto compresivo homogéneo; además, las variaciones observadas en esta etapa inicial pueden asociarse a manifestaciones tempranas del fenómeno stick-slip o bien a la inestabilidad transitoria del sistema de adquisición de datos mientras se eliminan los juegos mecánicos presentes.

- Fase II (Establecimiento de contacto y carga máxima): Una vez superada la etapa inicial caracterizada por inestabilidad; no obstante, se identifica una rampa de carga ascendente que alcanza un valor máximo cercano a los 30 N; dicho valor resulta claramente inferior al pico registrado en el ensayo A_1 (~40 N); en efecto, esta discrepancia indica una interfaz de contacto con menor eficacia o una distribución de presiones de contacto no óptima en esta configuración específica del montaje; asimismo, la inclinación de la curva en esta fase presenta menor definición que en el caso A_1, evidenciando pequeñas variaciones que revelan una respuesta mecánica con rigidez reducida.
 - Fase III (Deslizamiento con fluctuaciones): La transición hacia el régimen de deslizamiento no se materializa como una disminución abrupta única; por el contrario, exhibe una secuencia de múltiples picos y valles secundarios antes de alcanzar el colapso definitivo del sistema. Este patrón es característico de un fenómeno de stick-slip (agarre-deslizamiento) sostenido, donde el conductor avanza a saltos intermitentes debido a la competencia entre la regeneración de adherencia local y la liberación de energía por deslizamiento. La falla completa ocurre alrededor de las 7500 unidades, con un tiempo total (13 s) ligeramente menor al del ensayo A_1.
2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica
- El análisis descriptivo de LOAD2 revela parámetros coherentes con la curva observada:
 - Mediana (10.522 N) y Media (13.819 N) bajas: Estos valores, inferiores a los de otras muestras del mismo proveedor, confirman que este ensayo representó un caso de desempeño subóptimo dentro de la serie A. La baja mediana refleja que gran parte de la respuesta de carga se mantuvo en un rango modesto.
 - Amplio Rango Intercuartílico (6.576 N a 21.833 N): Esta dispersión del 50% central de los datos cuantifica la alta variabilidad e inestabilidad durante la aplicación de la carga, visible en las fluctuaciones de la curva.
 - Valor Mínimo Anómalo (-8.154 N): Este dato, más negativo que en otros ensayos, respalda la interpretación de una holgura inicial mayor o una condición de compresión inicial deficiente.
3. Análisis de los Mecanismos de Fricción y Estabilidad

El comportamiento observado en MEC_PROV_A_2 es un caso de estudio sobre la sensibilidad de los sistemas tribológicos a las condiciones de montaje:

- **Influencia del Alineamiento y Holgura:** La trayectoria inicial de la curva sugiere que la geometría de contacto no fue óptima al inicio de la prueba. Un desalineamiento leve puede causar un contacto asimétrico, reduciendo el área efectiva y generando un estado de tensión de compresión no uniforme, lo que disminuye la fuerza de fricción máxima alcanzable.
- **Fenómeno de Stick-Slip:** Las variaciones observadas durante las etapas de carga y deslizamiento constituyen la manifestación inequívoca de un régimen friccional caracterizado por inestabilidad; en efecto, dicho comportamiento resulta habitual cuando existe una diferencia pronunciada entre los coeficientes de fricción estática y dinámica, mientras que la elasticidad inherente al sistema facilita la acumulación progresiva y posterior liberación súbita de energía mecánica.
- **Implicaciones para la Confiabilidad:** A pesar de que el mecanismo de falla terminal continúa siendo el deslizamiento relativo; no obstante, la respuesta mecánica exhibida por el ensayo A_2 presenta un grado inferior de predictibilidad y una mayor vulnerabilidad frente a excitaciones vibratorias en comparación con el comportamiento registrado en el ensayo A_1. Esto ilustra cómo, incluso bajo un torque idéntico y con componentes del mismo proveedor, variaciones aleatorias en el montaje pueden degradar significativamente el desempeño y la estabilidad de la unión.

c) Análisis del ensayo MEC_PROV_A_3

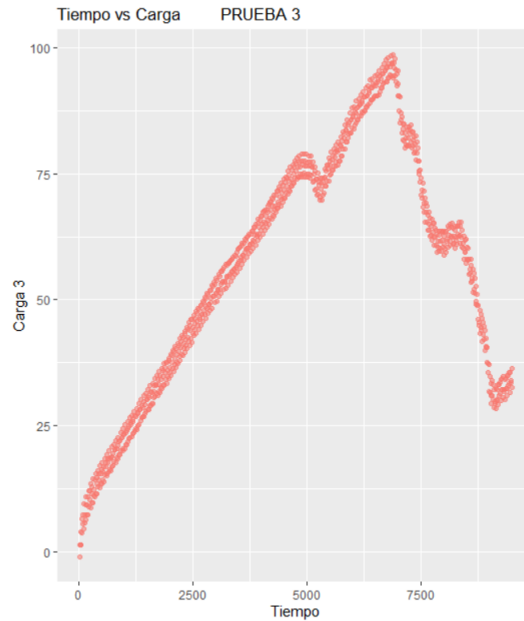


Figura 23: Análisis del ensayo MEC_PROV_A_3

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (Gráfica PRUEBA 3)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_A_3 exhibe el perfil más robusto y de mayor capacidad de carga dentro de la serie del Proveedor A. Se reconoce una respuesta mecánica caracterizada por una etapa de carga predominantemente estable junto con un valor máximo conspicuo; en consecuencia, el comportamiento registrado se desglosa en las siguientes fases:

- Fase I (Toma de Contacto y Carga Inicial): La representación gráfica se origina en un valor negativo reducido (-1.052 N, conforme a la medición LOAD3) y posteriormente evidencia una transición acelerada hacia valores positivos; por lo tanto, dicho patrón revela una configuración inicial del montaje con holguras mínimas; asimismo, el establecimiento del contacto funcional se produce de manera expedita, lo cual indica un alineamiento preciso y una interfaz debidamente consolidada desde el comienzo del procedimiento experimental.
- Fase II (Respuesta Cuasi-Lineal y Pico de Carga): Una vez concluida la etapa inicial; no obstante, se identifica una rampa de carga con inclinación marcadamente elevada y mantenida en el tiempo, la cual alcanza un valor máximo que supera ampliamente los 80 N (resultado coherente con el dato extremo de LOAD3: 98.642 N); en efecto, dicha pendiente acentuada refleja una rigidez axial considerable del conjunto una

vez logrado el contacto integral; además, la magnitud del pico obtenido demuestra que en este ensayo se alcanzó el umbral máximo de fricción estática dentro de la serie analizada, lo cual evidencia una interfaz de contacto óptima bajo la precarga generada por el par de apriete aplicado.

- Fase III (Falla por Deslizamiento): Inmediatamente posterior al valor máximo; por el contrario, se registra un descenso abrupto de la carga, rasgo distintivo de la transición hacia el régimen de fricción dinámica y el comienzo del deslizamiento macroscópico; en este caso, la transición se presenta con nitidez definida, carente de las fluctuaciones relevantes detectadas en ensayos previos; de esta manera, se infiere un mecanismo de falla más cohesivo y con menor grado de inestabilidad inherente.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD3 son consistentes con una curva de alto desempeño:

- Mediana elevada (60.237 N) junto con promedio alto (56.152 N): en consecuencia, dichos parámetros estadísticos centrales, que corresponden a los valores máximos registrados dentro de la secuencia experimental, corroboran que el ensayo en cuestión se desarrolló bajo un régimen de sollicitación mecánica superior durante la fracción predominante de su intervalo temporal de ejecución.
- Rango Intercuartílico Amplio (35.511 N a 74.968 N): Esta dispersión del 50% central de los datos abarca un intervalo de carga significativo, reflejando la extensa fase de carga estable previa al pico máximo. No indica inestabilidad, sino la progresión sostenida a través de un amplio rango de carga.
- Máximo Excepcional (98.642 N): Este valor, el más alto registrado para el Proveedor A, cuantifica el pico de capacidad de la interfaz en condiciones aparentemente óptimas de contacto.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_A_3 representa un caso cercano al desempeño óptimo para el modo de falla por deslizamiento en esta configuración:

- Condiciones de Interfaz Óptimas: La combinación de un buen alineamiento, una superficie de contacto efectiva máxima y una distribución uniforme de la presión de compresión (generada por el torque de 7 N·m) permitió maximizar la fuerza de

fricción estática disponible. Esto se traduce en una mayor capacidad para transferir carga de tracción al conductor antes de que ocurra el deslizamiento.

- Respuesta Estructural Rígida: La pendiente de carga pronunciada sugiere una mínima deformación compliante en la interfaz o en los elementos de sujeción una vez tomadas las holguras iniciales. Esta rigidez es deseable, ya que implica una transferencia de carga más eficiente y predecible.
- Transición de Falla Nítida: La caída abrupta post-pico sugiere que, una vez superado el límite de fricción estática, el deslizamiento se propagó de manera rápida y generalizada a través de toda la interfaz, sin fenómenos significativos de stick-slip que indicarían una liberación de energía más gradual e irregular.

d) Análisis del ensayo MEC_PROV_A_4

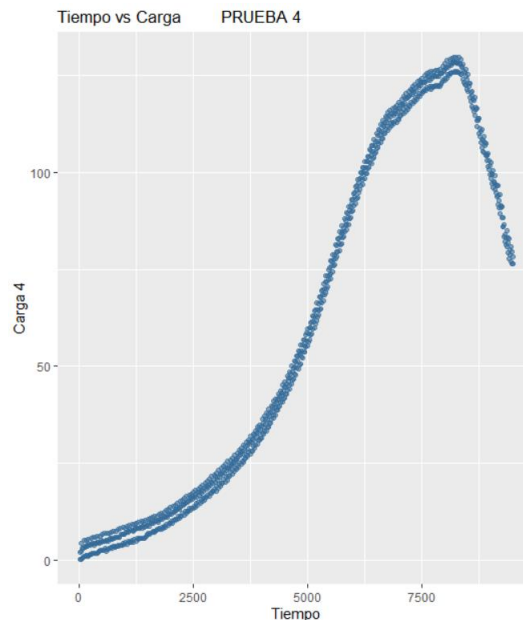


Figura 24: Análisis del ensayo MEC_PROV_A_4

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 4)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_A_4 muestra un perfil complejo y prolongado, caracterizado por una fase de carga inusualmente extensa con una pendiente variable y múltiples inflexiones, antes de alcanzar un pico de carga muy elevado. Este comportamiento sugiere un proceso de falla que involucra mecanismos secuenciales y redistribución de tensiones:

- Fase I (Contacto Progresivo y Ajuste): La curva inicia desde un valor positivo bajo (0.263 N, según LOAD4) y exhibe una pendiente inicial moderada que aumenta gradualmente. Esto indica un establecimiento progresivo y no instantáneo del contacto completo, posiblemente debido a un ajuste geométrico inicial o a la cedencia localizada de asperezas en la interfaz bajo carga creciente.
- Fase II (Carga Sostenida con No Linealidad): A diferencia de las respuestas más rígidas observadas en otros ensayos, esta curva presenta un amplio tramo donde la carga aumenta de manera sostenida, pero con una pendiente que cambia. Se observan al menos dos regiones con diferentes rigideces aparentes, lo que podría estar asociado a la activación secuencial de diferentes zonas de contacto dentro del conector o a la deformación plástica progresiva del conductor, la cual incrementa el área de contacto real a medida que avanza la prueba.
- Fase III (Pico de Carga Máxima y Falla): Tras la extensa fase de carga, se alcanza un pico de carga excepcionalmente alto, que según LOAD4 supera los 120 N (Max.: 129.681 N). Este pico va seguido de una caída abrupta, denotando el colapso final por deslizamiento. El tiempo total hasta la falla (12 s) es coherente con una curva que acumula carga durante un periodo prolongado.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD4 reflejan el comportamiento singular de esta curva:

- Mediana Moderada-Alta (50.505 N) y Media Alta (59.618 N): La media significativamente mayor que la mediana indica una distribución fuertemente sesgada a la derecha. Esto es consistente con una curva donde una gran parte de los datos de carga se concentran en valores moderados (representados por la mediana), pero existe un prolongado ascenso final hacia un valor máximo muy elevado que eleva el promedio.
- Rango Intercuartílico Muy Amplio (14.730 N a 107.059 N): Este intervalo extremadamente ancho para el 50% central de los datos cuantifica directamente la extensa fase de carga sostenida observada en la gráfica. Abarca desde cargas bajas hasta muy altas, capturando la naturaleza prolongada y progresiva del proceso de carga.

- Máximo Extremo (129.681 N): Este valor, el más alto de toda la serie del Proveedor A, confirma que en este ensayo se explotó al máximo la capacidad potencial de la interfaz, probablemente cercana al límite de resistencia del propio material del conductor antes del deslizamiento.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El perfil de MEC_PROV_A_4 sugiere un escenario donde el mecanismo de falla trascendió un simple deslizamiento por fricción de una interfaz estática, involucrando fenómenos de adaptación y daño progresivo:

- Deformación Plástica Progresiva y Conformado: La pendiente variable y la larga fase de carga pueden explicarse por una deformación plástica continua del conductor de aluminio en la zona de agarre. A medida que se aplica tracción, el conductor puede fluir plásticamente, aumentando el área de contacto y generando un fenómeno de conformado en frío que incrementa la fuerza de fricción de manera progresiva.
- Redistribución de Presión de Contacto: La no linealidad en la curva puede deberse a una redistribución dinámica de la presión de contacto a medida que el sistema se carga. Puntos inicialmente en contacto pueden ceder, transfiriendo la carga a zonas adyacentes, en un proceso que optimiza gradualmente la interfaz hasta alcanzar su configuración de máxima resistencia.
- Límite de Capacidad del Sistema: El pico máximo alcanzado sugiere que este ensayo operó en el límite superior del desempeño para esta configuración. La falla pudo deberse a una combinación de deslizamiento y un inicio de fractura incipiente o severa deformación en el conductor, tras haber aprovechado casi por completo su capacidad portante. El torque de 7 N·m, en este montaje particular, pudo generar una condición cercana al "punto óptimo" donde la unión es lo suficientemente fuerte para llevar al conductor cerca de su límite estructural.

e) Análisis del ensayo MEC_PROV_A_5

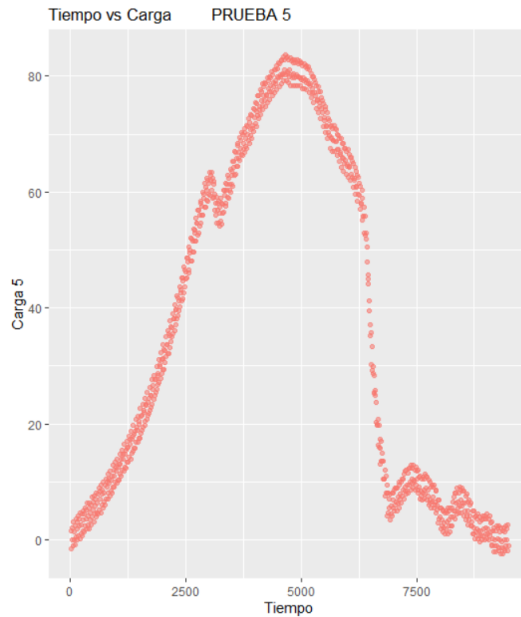


Figura 25: Análisis del ensayo MEC_PROV_A_5

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 5)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_A_5 exhibe un perfil mecánico caracterizado por una respuesta inicial suave seguida de una fase de carga con rigidez variable y un pico moderado, concluyendo con una falla por deslizamiento. La representación gráfica indica un comportamiento interfacial asociado a una adaptación de naturaleza plástica considerable durante la imposición de la sollicitación mecánica; por consiguiente, el patrón observado se desglosa en las siguientes etapas:

- Fase I (Toma de Contacto y Cedencia Inicial): La curva se origina en un valor negativo de magnitud intermedia (-2.367 N, conforme a la medición LOAD5) y posteriormente evoluciona gradualmente hacia la región de carga positiva; asimismo, la inclinación característica de este segmento inicial presenta una menor abruptez en comparación con ensayos como el A_1 o el A_3; en efecto, dicha característica sugiere una compliancia inicial más pronunciada o bien una velocidad reducida en la consolidación del contacto rígido; además, este comportamiento podría atribuirse a condiciones superficiales particulares del conductor o del conector que facilitan una deformación localizada con menor resistencia.

- Fase II (Carga con Pendiente Creciente y Pico): Una vez superada la etapa inicial; no obstante, la curva manifiesta un incremento progresivo en su inclinación, generando una configuración convexa orientada hacia el eje temporal; en consecuencia, esta variación en la rigidez aparente del sistema evidencia un fenómeno de endurecimiento por deformación (strain hardening) localizado en la zona de contacto del conductor o bien un aumento no lineal en el área real de contacto conforme las irregularidades superficiales se aplanan y adaptan mutuamente; finalmente, la sollicitación mecánica alcanza un valor máximo de intensidad moderada, cuantificado aproximadamente entre 60 y 80 N según la escala gráfica disponible, previo al colapso estructural del conjunto.
- Fase III (Falla por Deslizamiento): Después del pico, se observa una caída brusca de la carga, confirmando el modo de falla final por deslizamiento de la interfaz. El tiempo total hasta la falla (14 s) es coherente con una curva que muestra un periodo de carga sostenido.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD5 son consistentes con una curva de desempeño intermedio y con una distribución sesgada:

- Mediana Moderada (26.831 N) y Media Moderada-Alta (35.636 N): La diferencia entre la media y la mediana (la media es aproximadamente 9 N mayor) señala una distribución sesgada a la derecha. Esto refleja que, si bien gran parte de los datos se sitúan en un rango moderado (representado por la mediana), la fase final de carga ascendente hacia el pico aporta valores más altos que elevan el promedio.
- Rango Intercuartílico Amplio (7.102 N a 65.498 N): Este intervalo extenso para el 50% central de los datos cuantifica la amplia gama de estados de carga que experimentó el sistema. Abarca desde valores bajos, asociados a la fase inicial de ajuste y contacto parcial, hasta valores altos, vinculados a la fase de carga cuasi-lineal y el pico. Es indicativo de un proceso de carga con una evolución mecánica significativa.
- Máximo Considerable (83.648 N): Este valor confirma que el sistema alcanzó un nivel de carga respetable, aunque no el más alto de la serie. Corrobora la capacidad

de la interfaz para soportar una carga sustancial antes del deslizamiento en este ensayo particular.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento observado en MEC_PROV_A_5 ilustra un escenario donde el proceso de carga está dominado por la deformación plástica y el conformado de la interfaz:

- **Conformado en Frío y Aumento del Área de Contacto:** La forma convexa de la curva de carga sugiere que la resistencia al deslizamiento aumentó de manera no lineal con el desplazamiento. Este es un fenómeno típico cuando el conductor más blando (aluminio) se deforma plásticamente contra el conector, aplanando asperezas y aumentando progresivamente el área real de contacto microscópico (conformado en frío). A mayor área de contacto, mayor es la fuerza de fricción total.
- **Endurecimiento por Deformación del Material:** El aluminio del conductor experimenta endurecimiento por deformación en la zona sometida a alta presión y deformación. Este incremento en la resistencia a la cedencia del material contribuye a la mayor pendiente observada en la fase de carga principal, ya que el material se vuelve más resistente a una mayor deformación.
- **Interfaz Adaptativa:** Este ensayo ejemplifica una interfaz tribológica adaptativa. La interfaz no es estática; se modifica geométrica y mecánicamente durante la propia aplicación de la carga de tracción. La capacidad de carga final es, por tanto, el resultado de este proceso de optimización in situ, que depende de las propiedades mecánicas del conductor, la geometría inicial de contacto y la presión aplicada por el torque. La falla ocurre cuando el mecanismo de deslizamiento finalmente supera la capacidad de fricción generada por esta interfaz ya conformada y endurecida.

4.5.2. Para el proveedor B

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para los cinco ensayos correspondientes al Proveedor B, cuya falla característica fue el deslizamiento de ambos conductores eléctricos.

LOAD5	LOAD7	LOAD8	LOAD9	LOAD10
Min. :-18.413	Min. :-1.052	Min. :-3.157	Min. :-8.417	Min. :-3.683
1st Qu. :-14.994	1st Qu. :14.467	1st Qu. : 3.683	1st Qu. :-3.946	1st Qu. : 1.052
Median :-12.363	Median :37.615	Median : 8.944	Median : 7.365	Median : 4.209
Mean : 5.877	Mean :40.466	Mean :17.808	Mean :12.230	Mean : 5.052
3rd Qu. : 26.567	3rd Qu. :65.498	3rd Qu. :22.622	3rd Qu. :24.463	3rd Qu. : 8.680
Max. : 61.815	Max. :89.698	Max. :83.648	Max. :59.711	Max. :17.098

Cuadro 2: Datos estadísticos descriptivos de los ensayos obtenidos del Proveedor B de cargas medidas

a) Análisis del ensayo MEC_PROV_B_1

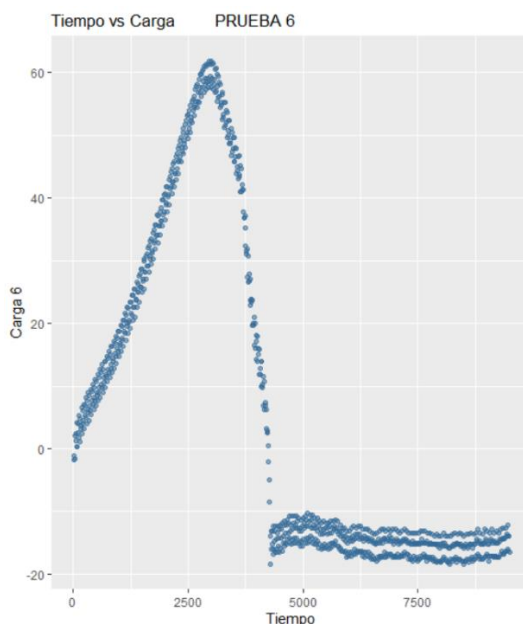


Figura 26: Análisis del ensayo MEC_PROV_B_1

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 6)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_B_1 exhibe un perfil mecánico altamente anómalo y no característico de una falla estructural controlada. La gráfica muestra una respuesta inicial predominantemente negativa seguida de una transición abrupta y caótica a valores positivos, sin la definición de un pico de carga claro o una fase de carga estable. Este comportamiento es indicativo de un fallo severo durante la fase inicial del ensayo o de un problema fundamental en el montaje/medición:

- Fase I (Respuesta Negativa Dominante): La representación gráfica se mantiene en el dominio de carga negativa durante una fracción considerable del intervalo temporal inicial (hasta aproximadamente las 4000 a 5000 unidades); por consiguiente, los valores negativos persistentes y de magnitud relevante (que

alcanzan cercanía a los -20 N según la escala disponible) no corresponden a una fuerza de tracción efectivamente aplicada; en efecto, dichos registros sugieren de manera contundente la presencia de un artefacto en el sistema de medición o bien un comportamiento mecánico anómalo; asimismo, esta condición podría atribuirse a una holgura extrema (backlash) inherente al mecanismo de sujeción, a un desalineamiento severo que induce un momento flector interpretado erróneamente como compresión, o a una anomalía en el transductor de carga (por ejemplo, una precarga inadecuada o un desequilibrio en su calibración).

- Fase II (Transición Caótica y Pico Aislado): Una vez concluido el prolongado intervalo de valores negativos; no obstante, la curva manifiesta una transición abrupta y altamente oscilatoria hacia la región positiva, alcanzando un pico aislado y agudo que aparentemente excede los 60 N de manera transitoria, previo a un descenso acelerado; en consecuencia, dicho patrón no replica la toma de contacto gradual característica de ensayos válidos; por el contrario, parece corresponder al resultado de un reacomodo súbito y violento de los componentes constitutivos (por ejemplo, el conductor "salta" bruscamente o se bloquea en una configuración distinta) que origina un incremento momentáneo de carga carente de representatividad respecto a la capacidad real de la unión mecánica.
- Ausencia de Fases Definidas: No se distinguen las fases típicas de ajuste, carga elástica y falla. La curva carece de una rampa de carga definida, lo que invalida su uso para extraer parámetros mecánicos como la rigidez o el límite de fricción estática de la interfaz.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD6 confirman de manera contundente la naturaleza anómala de este ensayo:

- Parámetro mediano de signo negativo (-12.363 N): por consiguiente, la condición de negatividad asociada al valor central de la distribución constituye una evidencia concluyente de que el conjunto de mediciones carece de validez como registro experimental de un ensayo de tracción axial; en efecto, bajo protocolos convencionales de este tipo de prueba, el parámetro mediano correspondiente a la carga necesariamente debe adoptar valores positivos.

- Media Baja y Positiva (5.877 N) con Gran Discrepancia: La media positiva se debe exclusivamente al pico positivo aislado al final de la prueba. La enorme diferencia entre la media (5.9 N) y la mediana (-12.4 N) subraya la bimodalidad extrema de los datos: un conjunto grande de valores negativos y un pequeño conjunto de valores positivos altos. Esto no es una distribución de datos de ensayo, sino la huella de un evento experimental fallido.
- Rango Intercuartílico que Abarca Cero (-14.994 N a 26.867 N): Este rango confirma que el 50% central de los datos se reparte a ambos lados del cero, capturando tanto la fase negativa dominante como el inicio de la transición errática.
- Mínimo Extremo (-18.413 N) y Máximo Moderado (61.815 N): Estos valores delimitan el comportamiento errático completo, desde la compresión anómala máxima hasta el pico transitorio de tracción.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

Dada la naturaleza del registro, no es posible realizar un análisis significativo de los mecanismos de contacto y fricción de la unión MEC_PROV_B_1. La curva no captura la respuesta mecánica del sistema conector-conductor bajo carga controlada, sino que documenta una falla en el procedimiento experimental o en la configuración del montaje. Las posibles causas, desde una perspectiva de ingeniería mecánica, incluyen:

- Configuración Inadecuada del Montaje: El conductor posiblemente no se encontraba debidamente posicionado ni fijado en su ubicación correspondiente; por consiguiente, dicha condición generó una holgura axial excesiva que el equipo de ensayo debió compensar mediante desplazamiento previo a la aplicación efectiva de tracción; de esta manera, dicho recorrido previo fue registrado erróneamente como una fuerza de signo negativo.
- Anomalía en la Instrumentación: Una desviación en los procedimientos de calibración, ajuste del punto cero o compensación de la celda de carga junto con el sistema de adquisición de datos pudo haber originado mediciones espurias.
- Fractura Temprana no Prevenida: La ocurrencia de una rotura o desacople abrupto durante las etapas iniciales del ensayo; no obstante, pudo haber liberado energía almacenada de forma instantánea; en efecto, este fenómeno habría inducido oscilaciones no deseadas en el sistema encargado del registro de mediciones.

b) Análisis del ensayo MEC_PROV_B_2



Figura 27: Análisis del ensayo MEC_PROV_B_2

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 7)

El perfil de la curva Tiempo versus Carga correspondiente al ensayo MEC_PROV_B_2 manifiesta el comportamiento más sólido y claramente definido dentro del conjunto de pruebas realizadas por el Proveedor B; en consecuencia, dicho registro exhibe una respuesta mecánica caracterizada por etapas marcadamente diferenciadas, incluyendo un valor máximo de carga elevado junto con una falla abrupta; por lo tanto, este patrón sugiere un desempeño estructural más coherente y una interfaz de contacto altamente efectiva durante este ensayo particular:

- Fase I (Ajuste Inicial y Toma de Contacto): La representación gráfica se origina en un valor negativo reducido (-1.052 N, conforme a la medición LOAD7) y posteriormente efectúa una transición acelerada y fluida hacia la zona de carga positiva; asimismo, esta etapa resulta sumamente breve, lo cual indica una configuración inicial del montaje con holguras mínimas y un alineamiento preciso, facilitando de este modo un establecimiento eficaz del contacto compresivo.
- Fase II (Respuesta Cuasi-Lineal y Pico Pronunciado): Una vez concluida la fase de ajuste inicial; no obstante, se identifica una rampa de carga con inclinación

marcadamente elevada y sorprendentemente lineal que se prolonga durante un intervalo temporal considerable; en efecto, dicha constancia en la pendiente refleja una rigidez axial homogénea y una interfaz debidamente consolidada; además, la sollicitación mecánica alcanza un valor máximo conspicuo que excede los 80 N (resultado coherente con el dato extremo de LOAD7: 89.698 N), el cual representa el umbral máximo de resistencia de la unión en este ensayo específico.

- Fase III (Falla Súbita): Inmediatamente posterior al valor máximo; por el contrario, se registra un descenso vertical e integral de la carga hasta magnitudes próximas a cero. Esta caída instantánea es característica de una fractura frágil o un deslizamiento catastrófico sin fenómenos significativos de stick-slip posteriores. El tiempo total hasta la falla (19 s) se correlaciona con una curva que muestra una fase de carga sostenida antes del colapso final.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD7 respaldan la interpretación de un ensayo de alto desempeño y comportamiento concentrado:

- Mediana Alta (37.615 N) y Media Alta (40.466 N): La proximidad entre la mediana y la media sugiere una distribución relativamente simétrica y concentrada alrededor de un valor central alto. Esto refleja que la mayor parte del registro de carga se situó en un rango elevado, consistente con la larga fase de carga cuasi-lineal observada.
- Rango Intercuartílico Amplio y en Zona Positiva (14.467 N a 65.498 N): Este intervalo, que abarca únicamente valores positivos y un amplio espectro de carga, cuantifica la extensa fase de carga estable previa al pico. Indica que el sistema operó en un régimen de carga significativo durante la mayor parte de la prueba, sin las fluctuaciones erráticas de otros ensayos de esta serie.
- Máximo Muy Elevado (89.698 N): Este valor, el más alto registrado para el Proveedor B, confirma la capacidad excepcional de la interfaz en este montaje particular para transferir carga antes de la falla, acercándose a los valores máximos observados en el Proveedor A.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_B_2 sugiere que, en esta instancia particular, la configuración del Proveedor B operó cerca de su potencial óptimo, con una interfaz que combinó un buen contacto inicial con una respuesta estructural rígida:

- Interfaz de Contacto Efectiva y Bien Distribuida: La rápida toma de contacto y la respuesta lineal indican que la presión generada por el torque de 7 N·m se distribuyó de manera uniforme y efectiva sobre un área de contacto sustancial desde el inicio de la carga de tracción. Esto maximizó la fuerza de fricción estática disponible.
- Modo de Falla Catastrófico Post-Pico: La caída vertical de la carga sugiere un mecanismo de falla repentino y total. Dado el alto valor del pico, es plausible que la falla haya sido una fractura del conductor (o de su sección debilitada) una vez superado su límite de resistencia, o un deslizamiento global e instantáneo de toda la interfaz una vez vencida la fricción estática. La falta de una meseta o oscilaciones post-pico descarta un deslizamiento progresivo o inestable.
- Indicador del Potencial del Sistema: Este ensayo demuestra que, bajo condiciones de montaje aparentemente óptimas, la configuración del Proveedor B puede alcanzar un desempeño mecánico elevado. La marcada diferencia entre este resultado y el de otros ensayos de la misma serie (como B_1 o B_5) enfatiza la extrema sensibilidad y la criticidad de las condiciones de interfaz para este diseño. Pequeñas variaciones en el alineamiento, la limpieza superficial o la distribución inicial de la presión pueden causar diferencias abismales en la carga de falla, oscilando entre un comportamiento casi óptimo y uno deficiente o errático.

c) Análisis del ensayo MEC_PROV_B_3

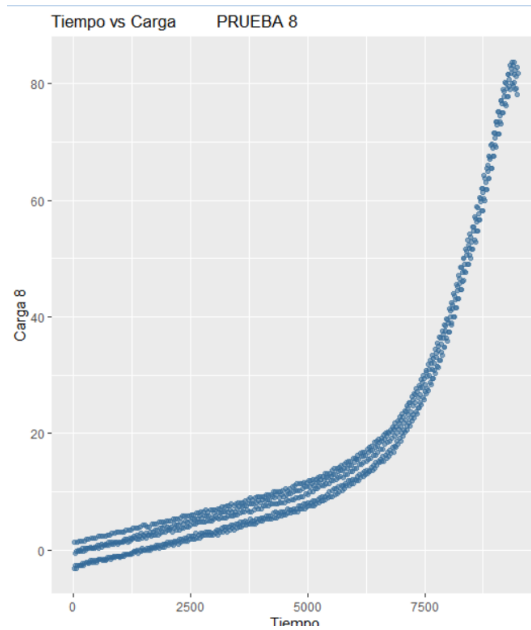


Figura 28: Análisis del ensayo MEC_PROV_B_3

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 8)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_B_3 presenta un perfil mecánico marcado por una respuesta inicial errática, seguida de una fase de carga moderada con notables fluctuaciones y una falla no catastrófica. Este comportamiento refleja una interfaz de contacto inestable y un mecanismo de falla que involucra periodos alternados de agarre parcial y deslizamiento:

- Fase I (Contacto Inestable y Oscilaciones): La curva inicia desde un valor negativo moderado (-3.157 N, según LOAD8) y exhibe oscilaciones significativas alrededor de la línea base durante un periodo prolongado (aproximadamente las primeras 3000 unidades de tiempo). Estas fluctuaciones no son ruido aleatorio, sino que indican fenómenos de micro-deslizamientos (stick-slip) o ajustes geométricos repetidos a medida que se aplica la carga inicial. Sugieren una distribución de presión de contacto desigual o puntos de contacto discretos que ceden y se reestablecen secuencialmente.
- Fase II (Carga Ascendente con Fluctuaciones Persistentes): Una vez superada la fase inicial más inestable, la carga comienza una tendencia ascendente general. Sin embargo, esta tendencia no es suave, sino que está superpuesta con continuas

fluctuaciones de menor amplitud. La pendiente media de esta fase es moderada, indicando una rigidez global menor que en ensayos como el B_2. La carga alcanza un pico principal no muy pronunciado, estimado por debajo de los 60 N, antes de iniciar el descenso.

- Fase III (Descenso Gradual o Falla Progresiva): A diferencia de las caídas bruscas observadas en otros ensayos, la curva aquí muestra un descenso más gradual o escalonado después del pico. Este patrón es consistente con un deslizamiento progresivo o una falla por cedencia donde la interfaz no colapsa de inmediato, sino que pierde capacidad de carga de manera continua a medida que el conductor se desplaza. El tiempo total hasta la falla (27 s) es el más largo de la serie B, correlacionándose con este proceso de falla más prolongado.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD8 reflejan la naturaleza moderada y dispersa del comportamiento:

- Mediana Baja (8.944 N) y Media Moderada (17.808 N): La media es el doble de la mediana, lo que indica una fuerte asimetría positiva (sesgo a la derecha). Esto significa que, aunque la mayoría de las lecturas de carga fueron bajas (representadas por la mediana), existieron periodos o picos de carga más altos que elevan el promedio. Esto es coherente con una curva que pasa mucho tiempo en valores bajos/inestables, pero que logra algunos picos moderados.
- Rango Intercuartílico en Zona Positiva Baja (3.683 N a 22.622 N): Este intervalo confirma que el 50% central de los datos de carga se mantuvo en un rango bajo a moderado. Corrobora que el sistema nunca alcanzó un régimen de carga alta y estable de manera sostenida.
- Máximo Considerable (83.648 N): Este valor máximo, aunque alto, parece corresponder a un pico transitorio o aislado dentro de una respuesta generalmente modesta, tal como se infiere de la diferencia con la mediana. No representa la capacidad sostenida de la interfaz.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El perfil de MEC_PROV_B_3 es representativo de una interfaz tribológicamente inestable y un montaje subóptimo:

- **Contacto Discreto y Distribución de Presión No Uniforme:** Las oscilaciones iniciales y las fluctuaciones persistentes son síntomas clásicos de un contacto que ocurre en puntos aislados (contacto de asperezas) en lugar de un área continua. Bajo carga, estos puntos de contacto individuales alcanzan su límite de cedencia o deslizamiento, causando un micro-movimiento (caída de carga) antes de que la carga se transfiera a un nuevo punto de contacto, generando la siguiente fluctuación.
- **Fenómeno de Stick-Slip Pronunciado:** Todo el ensayo está dominado por este mecanismo. La diferencia entre los coeficientes de fricción estática y dinámica, junto con la elasticidad del sistema, provoca ciclos repetidos de agarre (aumento de carga), micro-cedencia o deslizamiento (caída de carga), y re-agarre.
- **Falla por Agotamiento de la Capacidad de Fricción:** El descenso gradual post-pico sugiere que la unión no falló por una fractura súbita, sino por un agotamiento progresivo de la capacidad de la interfaz para regenerar fuerzas de agarre. Una vez que un número crítico de puntos de contacto han cedido o se han desgastado, el deslizamiento se generaliza de manera progresiva, llevando la carga a cero de forma más gradual que en una falla frágil.

d) Análisis del ensayo MEC_PROV_B_4

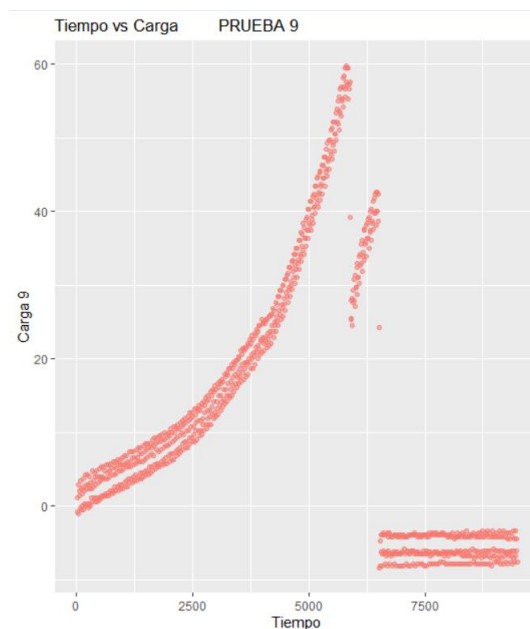


Figura 29: Análisis del ensayo MEC_PROV_B_4

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 9)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_B_4 presenta un perfil mecánico con una respuesta inicial moderadamente inestable, seguida de una fase de carga relativamente estable que culmina en un pico definido y una falla abrupta. El patrón de respuesta indica una interfaz capaz de alcanzar estabilidad tras una etapa inicial de acomodamiento; en consecuencia, dicha condición permite obtener una capacidad portante de nivel intermedio:

- Fase I (Ajuste Inicial con Ligera Inestabilidad): La representación gráfica se origina en un valor negativo de magnitud moderada (-8.417 N, conforme a la medición LOAD9) y posteriormente evidencia una transición hacia valores positivos acompañada de oscilaciones de escasa intensidad; asimismo, estas variaciones iniciales, pese a su presencia, presentan una amplitud y duración reducidas en comparación con las registradas en ensayos como el B_3; por lo tanto, este comportamiento revela un intervalo de ajuste y establecimiento del contacto más breve y menos problemático.
- Fase II (Carga Ascendente con Tendencia Lineal): Una vez superada la etapa inicial; no obstante, la curva manifiesta una progresión ascendente de la carga caracterizada por una inclinación aproximadamente invariable y una dispersión mínima; en efecto, dicha fase representa el comportamiento de una interfaz debidamente consolidada, donde la sollicitación mecánica se incrementa de forma previsible conforme avanza el desplazamiento impuesto; además, la carga alcanza un valor máximo claramente definido, cuantificado aproximadamente en 60 N según la escala gráfica disponible.
- Fase III (Falla Súbita Post-Pico): Inmediatamente posterior al valor máximo; por el contrario, se registra un descenso abrupto e integral de la carga; en consecuencia, dicha transición repentina evidencia un colapso catastrófico de la integridad estructural de la unión, característico bien de una fractura del elemento conductor o bien de un deslizamiento generalizado e instantáneo una vez rebasado el umbral de fricción estática. El tiempo total hasta la falla (14 s) es coherente con una curva que incluye un periodo de ajuste y una fase de carga sostenida.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD9 son consistentes con un ensayo de desempeño intermedio y con cierta dispersión:

- Mediana Moderada-Baja (7.365 N) y Media Moderada (12.230 N): La media es superior a la mediana, indicando un sesgo positivo moderado en la distribución. Esto refleja que, si bien un conjunto significativo de lecturas se agrupa en valores bajos (probablemente asociados a la fase inicial de ajuste), la fase de carga estable aporta valores más altos que elevan el promedio general.
- Rango Intercuartílico Amplio que Cruza Cero (-3.946 N a 24.463 N): Este intervalo muestra que el 50% central de los datos se extiende desde valores ligeramente negativos hasta valores positivos moderados. La presencia del límite inferior negativo confirma la fase inicial de ajuste con holgura, mientras que el límite superior positivo captura el rango de carga durante la fase estable previa al pico máximo.
- Máximo Considerable (59.711 N): Este valor, que coincide con el pico observado en la gráfica, representa la capacidad máxima alcanzada por la unión en este ensayo. Es un valor intermedio dentro de la serie del Proveedor B, superior a los obtenidos en ensayos claramente erráticos (B_1, B_3, B_5) pero inferior al máximo excepcional de B_2.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_B_4 ilustra un caso en el que la configuración logra un desempeño funcional, aunque no óptimo, tras superar una condición inicial subóptima:

- Estabilización de la Interfaz tras el Ajuste Inicial: La transición desde una fase inicial con oscilaciones hacia una fase de carga estable sugiere que los componentes encontraron una configuración geométrica estable y un patrón de contacto efectivo después de un corto periodo de acomodación. Una vez logrado esto, la interfaz se comportó de manera predecible y con una rigidez aparente constante.
- Límite de Falla Bien Definido: La presencia de un pico claro seguido de una caída abrupta indica que el sistema alcanzó un límite mecánico bien definido. Este límite podría ser la resistencia máxima a la tracción de una sección del conductor ya ligeramente dañada o el límite de fricción estática global de la interfaz estabilizada.

La naturaleza súbita de la falla sugiere que no hubo un fenómeno de deslizamiento progresivo significativo.

- Representatividad del Comportamiento "Promedio" para la Serie B: Este ensayo, con su fase inicial imperfecta, su fase de carga estable y su falla súbita a una carga intermedia, podría considerarse representativo del desempeño típico o esperable para la configuración del Proveedor B bajo el torque de 7 N·m, excluyendo los casos extremos (anómalo B_1 y óptimo B_2). Refleja una unión que funciona, pero cuya confiabilidad y capacidad máxima son sensibles a lograr una interfaz estable durante el montaje inicial.

e) Análisis del ensayo MEC_PROV_B_5

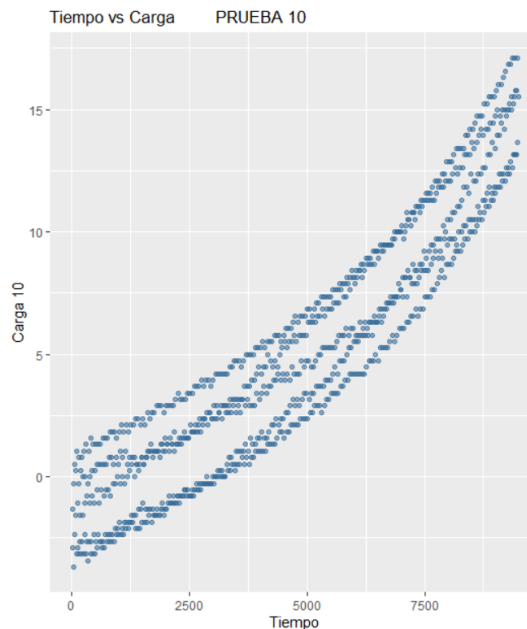


Figura 30: Análisis del ensayo MEC_PROV_B_5

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 10)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_B_5 presenta un perfil mecánico de baja capacidad y alta inestabilidad, caracterizado por una respuesta oscilatoria dominante sin una fase de carga sostenida clara. Este comportamiento es indicativo de una interfaz de contacto deficiente que opera predominantemente en un régimen de fricción dinámica inestable (stick-slip severo) desde las etapas iniciales de la prueba:

- Fase de Comportamiento Globalmente Inestable: A diferencia de curvas con fases bien diferenciadas, esta gráfica muestra oscilaciones de amplitud considerable superpuestas a una tendencia de carga general muy baja. La curva parece fluctuar caóticamente entre aproximadamente -10 N y +20 N durante la mayor parte de su duración, sin lograr establecer un incremento de carga monótono y estable. Esto sugiere que la unión nunca desarrolló un contacto estático efectivo; en su lugar, los componentes experimentaron deslizamientos y re-enganches parciales continuos.
- Ausencia de un Pico de Carga Definido: No se identifica un pico máximo claro y aislado. En su lugar, se observan múltiples picos secundarios de baja magnitud dentro del rango de oscilación. La "falla" final parece ser simplemente el punto donde estas oscilaciones cesan y la carga cae a cero, probablemente porque el conductor se ha extraído completamente o ha perdido todo contacto mecánico efectivo.
- Tiempo de Falla Prolongado en un Régimen No Productivo: El tiempo total hasta la falla (21 s) es engañosamente largo, ya que no representa un periodo de carga estructural significativa, sino un prolongado periodo de fricción inestable y desplazamiento irregular sin transferencia eficiente de carga.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD10 son elocuentes respecto al pobre desempeño y la naturaleza errática del ensayo:

- Mediana Muy Baja (4.209 N) y Media Muy Baja (5.052 N): Ambos valores centrales son extremadamente bajos, confirmando que la carga se mantuvo predominantemente en un rango insignificante durante casi toda la prueba. La proximidad entre mediana y media sugiere una distribución simétrica pero centrada en un valor cercano a cero, lo que es consistente con una señal oscilatoria alrededor de un valor bajo.
- Rango Intercuartílico Muy Estrecho y Bajo (1.052 N a 8.680 N): Este intervalo extremadamente angosto para el 50% central de los datos indica que, a pesar de las oscilaciones visibles, la mayoría de las lecturas de carga se apiñaron en valores muy próximos a cero. Esto refuerza la idea de que las fluctuaciones, aunque visibles, eran de amplitud limitada en torno a una línea base de carga casi nula.

- Máximo Muy Bajo (17.098 N): Este valor, el más bajo de los máximos registrados para la serie B (excluyendo el atípico B_1), cuantifica la incapacidad total de esta configuración particular para alcanzar cargas significativas. Corrobora que la interfaz nunca se estabilizó lo suficiente como para resistir una tracción sustancial.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El perfil de MEC_PROV_B_5 es emblemático de una falla total en el establecimiento de una unión mecánica efectiva:

- Fricción de Coulomb Inestable (Stick-Slip Severo): La curva es un caso de libro de texto del fenómeno de stick-slip. El sistema posee una elasticidad que almacena energía cuando la fricción estática detiene el movimiento ("stick"). Cuando la fuerza elástica acumulada supera la fricción estática local, ocurre un deslizamiento súbito ("slip"), liberando energía y causando una caída de carga. Este ciclo se repite de manera caótica, impidiendo cualquier carga progresiva.
- Interfaz con Presión de Contacto Insuficiente o Superficie Inadecuada: El torque de 7 N·m, en este montaje, fue insuficiente para generar una presión de contacto normal (F_n) lo bastante alta como para superar la inestabilidad inicial y establecer un agarre estático. Alternativamente, las superficies de contacto podrían haber estado contaminadas (grasa, óxido) o ser excesivamente duras/lisas, resultando en un coeficiente de fricción muy bajo que favorece el deslizamiento sobre el agarre.
- Falla por Incapacidad de Transferir Carga: El mecanismo de falla no fue la fractura del conductor ni el deslizamiento tras una carga alta, sino la incapacidad inherente de la interfaz para generar una fuerza de fricción útil. La "prueba" fue, en esencia, un proceso de fricción dinámica irregular que terminó con la extracción completa del conductor sin haberlo sometido a una tensión relevante.

4.5.3. Para el proveedor C

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para los cinco ensayos correspondientes al Proveedor C, cuya falla característica fue la fractura del conductor de aluminio, precedida en algunos casos por deslizamiento inicial.

LOAD11	LOAD12	LOAD13	LOAD14	LOAD15
Min. : -19.413	Min. : -10.470	Min. : -0.737	Min. : -9.154	Min. : -4.157
1st Qu.: -15.204	1st Qu.: 6.365	1st Qu.: 14.415	1st Qu.: -3.946	1st Qu.: 1.104
Median : -12.152	Median : 10.522	Median : 50.452	Median : 7.313	Median : 4.261
Mean : 5.848	Mean : 13.793	Mean : 59.622	Mean : 12.262	Mean : 5.099
3rd Qu.: 26.094	3rd Qu.: 21.781	3rd Qu.: 107.007	3rd Qu.: 23.885	3rd Qu.: 8.733
Max. : 62.289	Max. : 37.563	Max. : 130.681	Max. : 60.448	Max. : 17.835

Cuadro 3: Datos estadísticos descriptivos de los ensayos obtenidos del Proveedor C de cargas medidas

a) Análisis del ensayo MEC_PROV_C_1

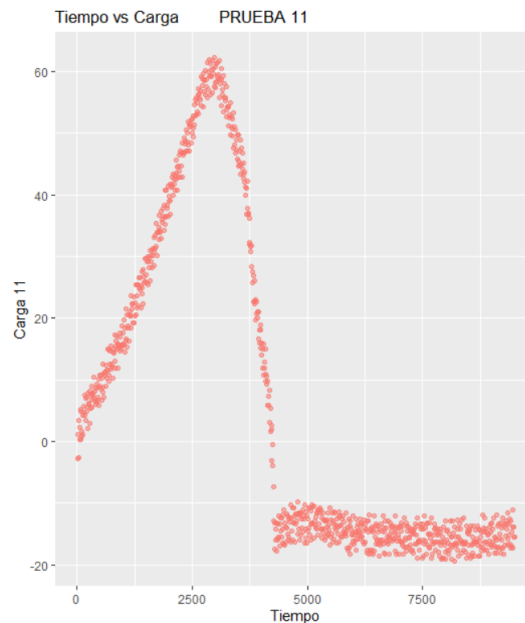


Figura 31: Análisis del ensayo MEC_PROV_C_1

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 11)

El perfil de la curva Tiempo versus Carga correspondiente al ensayo MEC_PROV_C_1 exhibe un comportamiento mecánico marcadamente atípico y carente de coherencia estructural; en efecto, dicho registro se caracteriza por una respuesta inicial intensamente negativa seguida de una transición súbita hacia un régimen oscilatorio de escasa amplitud; por consiguiente, este patrón resulta incompatible con los criterios de validez propios de un ensayo de tracción convencional; asimismo, sugiere la presencia de un fallo crítico en la configuración del montaje, un deterioro irreversible preexistente en el conductor o bien una perturbación significativa en el sistema de medición:

- Fase de Compresión Anómala Sostenida: La representación gráfica se mantiene en el dominio de carga negativa pronunciada (por debajo de -15 N) durante una

fracción considerable del intervalo temporal inicial. En un ensayo de tracción axial, una lectura negativa sostenida y de esta magnitud indica que el sistema está registrando una fuerza de compresión neta, lo cual es físicamente contradictorio. Esto apunta de manera concluyente a que el conductor ya estaba severamente dañado, doblado o no estaba correctamente sujeto antes de iniciar la tracción. El equipo podría haber estado aplicando desplazamiento para "tomar la holgura" de un conductor flojo o colapsado.

- **Transición a Régimen Oscilatorio No Estructural:** Tras la fase negativa, la curva realiza una transición brusca a valores positivos, pero no desarrolla una fase de carga elástica o plástica. En su lugar, se establece un régimen de oscilaciones irregulares de baja amplitud (entre aproximadamente 0 y 25 N). Estas oscilaciones no representan la respuesta de un material que se deforma, sino que son más consistentes con el arrastre o fricción irregular de los restos de un conductor fracturado o severamente deformado dentro del conector.
- **Ausencia Total de un Pico de Falla Estructural:** No se observa un pico de carga que denote la superación del límite elástico, plástico o de fractura de un material intacto. La "falla" final parece ser simplemente el cese de la señal, indicando que el conductor fue completamente extraído o perdió todo contacto mecánico sin haber ofrecido resistencia estructural significativa.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD11 son la firma cuantitativa de un ensayo inválido:

- **Mediana Negativa Profunda (-12.162 N):** El hecho de que el valor central de la distribución sea negativo y de gran magnitud es una prueba estadística irrefutable de que el ensayo no midió una fuerza de tracción neta. Este dato, por sí solo, invalida el ensayo para cualquier análisis estructural.
- **Media Baja Positiva (5.848 N) con Discrepancia Extrema:** La media positiva es un artefacto matemático causado por los picos positivos de las oscilaciones tardías. La abismal diferencia entre la media (5.8 N) y la mediana (-12.2 N) evidencia una bimodalidad extrema en los datos, separando claramente la fase de compresión anómala de la fase de fricción residual.

- Rango Intercuartílico Dominado por Valores Negativos (-15.204 N a 26.094 N): Que el 50% central de los datos se inicie en un valor fuertemente negativo y se extienda apenas hacia lo positivo confirma que la mayoría de las mediciones correspondieron a la fase de compresión o a su transición inmediata.
- Máximo Moderado (62.289 N) como Artefacto Aislado: Este valor máximo parece corresponder a un pico transitorio y aislado durante la fase oscilatoria, posiblemente causado por un enganche momentáneo de una parte del conductor dañado. No representa la capacidad de carga de un sistema íntegro.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

Dada la evidencia, no es posible analizar los mecanismos de contacto y fricción de una unión funcional. En su lugar, el ensayo documenta las consecuencias de un pre-daño catastrófico o un error de montaje:

- Hipótesis de Pre-Daño por sobreajuste: El torque de 7 N·m pudo haber fracturado, cortado severamente o deformado plásticamente de manera crítica el conductor de aluminio durante el apriete. Al iniciar el ensayo de tracción, el equipo no encontró un conductor sólido, sino fragmentos o una sección severamente comprometida, lo que explica la falta de rigidez y la respuesta errática.
- Hipótesis de Montaje Incorrecto: El conductor pudo no haber sido insertado completamente o estar suelto, generando una holgura axial extrema. El recorrido inicial del actuador para tomar esta holgura se registró como compresión (fuerza negativa) hasta que contactó con el extremo del conductor o con los fragmentos de este.
- Mecanismo Registrado: Lo que la curva captura no es la falla de una unión, sino el proceso de arrastre y fricción de los componentes rotos o mal ensamblados. Las oscilaciones positivas representan la fricción irregular durante este arrastre.

b) Análisis del ensayo MEC_PROV_C_2

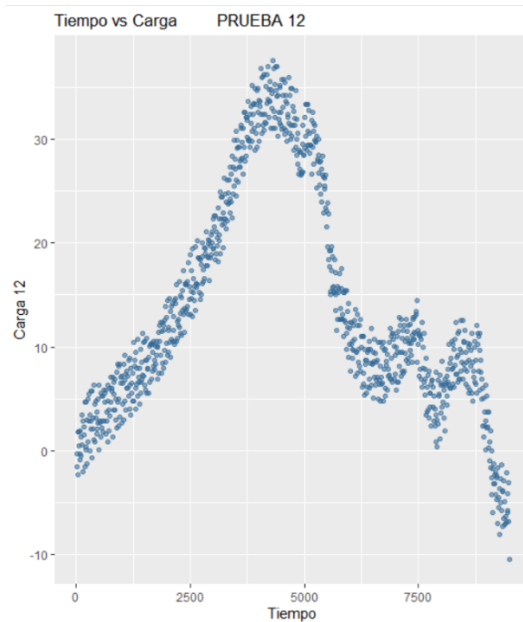


Figura 32: Análisis del ensayo MEC_PROV_C_2

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 12)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_C_2 exhibe un perfil mecánico de baja capacidad y alta inestabilidad, dominado por fluctuaciones significativas desde el inicio y la ausencia de una fase de carga sostenida. Este comportamiento refleja una interfaz de contacto inicialmente dañada o inefectiva, que opera en un régimen de fricción dinámica inestable (stick-slip severo) sin lograr establecer un agarre estático significativo:

- Fase de Ajuste Inicial Inestable: La curva inicia desde un valor negativo considerable (-10.470 N, según LOAD12) y muestra oscilaciones de amplitud moderada a alta durante las primeras 2500-3000 unidades de tiempo. Estas variaciones iniciales constituyen una manifestación inequívoca de un proceso complejo y no lineal de eliminación de holguras; en efecto, dicho comportamiento posiblemente se origina en un estado previo de deterioro del conductor por deformación plástica o bien en una condición de asentamiento deficiente posterior a la aplicación del par de apriete de 7 N·m.
- Fase de Comportamiento Oscilatorio Persistente: Una vez transcurrido el intervalo inicial caracterizado por mayor irregularidad; no obstante, la representación gráfica no alcanza una estabilización en forma de rampa ascendente de carga; por el

contrario, se instaura un régimen de oscilaciones continuas que exhibe una tendencia media de sollicitación ligeramente positiva, aunque de magnitud sumamente reducida. La carga fluctúa de manera irregular, principalmente entre -10 N y +30 N. Esta respuesta es característica de un sistema donde los componentes no están en contacto íntimo y uniforme, sino que experimentan ciclos repetidos de micro-enganches y deslizamientos.

- Carencia de un Valor Máximo de Falla Estructural Bien Definido: No se identifica un incremento máximo de sollicitación mecánica claramente discernible que anteceda a un descenso abrupto; en efecto, el fenómeno denominado "falla" aparenta corresponder a un mecanismo gradual en el cual las oscilaciones terminan por extinguirse progresivamente y la carga decae hasta valores nulos; por consiguiente, dicho comportamiento sugiere que el conductor se liberó definitivamente luego de un intervalo prolongado caracterizado por fricción subóptima y movimiento no uniforme. El tiempo total de falla (15 s) se correlaciona con este proceso prolongado de extracción por fricción inestable.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD12 reflejan un desempeño pobre y una distribución sesgada por valores bajos:

- Mediana Baja (10.522 N) y Media Baja (13.793 N): Ambos valores centrales son bajos, confirmando que la carga se mantuvo predominantemente en un rango insignificante. La media ligeramente superior a la mediana indica un sesgo positivo leve, sugerente de que algunos picos positivos dentro de las oscilaciones fueron ligeramente más altos que los valles negativos.
- Rango Intercuartílico en Zona Positiva Baja (6.365 N a 21.781 N): Este intervalo indica que el 50% central de las mediciones de carga fueron positivas, pero de valor modesto. Sin embargo, es crucial notar que el mínimo global es -10.470 N, lo que significa que hubo lecturas negativas significativas fuera de este rango central, capturadas en la fase inicial errática.
- Máximo Moderado-Bajo (37.563 N): Este valor representa el pico positivo más alto alcanzado durante las oscilaciones. Es un valor bajo que confirma la incapacidad del

sistema para alcanzar cargas estructuralmente significativas, muy por debajo del potencial de un conductor de aluminio intacto.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_C_2 es sintomático de una unión que falló en su función primaria de transferir carga por fricción estática, degenerando en un proceso de fricción dinámica irregular:

- Pre-daño y Contacto Ineficaz: El torque de 7 N·m muy probablemente indujo una deformación plástica excesiva o un corte parcial del conductor, reduciendo el área de sección transversal efectiva y creando una superficie de contacto irregular y posiblemente reblandecida. Al aplicar tracción, esta superficie dañada no puede generar una presión de contacto uniforme y alta, resultando en un coeficiente de fricción efectivo muy bajo.
- Dominancia del Fenómeno de Stick-Slip: La respuesta oscilatoria es la firma de una inestabilidad tribológica. La elasticidad del sistema (conductor, conector, máquina) almacena energía durante los breves periodos de "agarre" (stick), la cual se libera repentinamente en un "deslizamiento" (slip) cuando se supera la fricción estática local. Este ciclo se autoperpetúa, impidiendo la acumulación de carga.
- Falla por Extracción con Fricción Dinámica: El mecanismo de falla final no fue una fractura súbita ni un deslizamiento tras un pico de carga alta. Fue la extracción progresiva del conductor a través de un proceso de fricción dinámica inestable y de baja magnitud. La unión nunca llegó a estar lo suficientemente "apretada" en sentido tribológico como para movilizar la resistencia del material.

c) Análisis del ensayo MEC_PROV_C_3

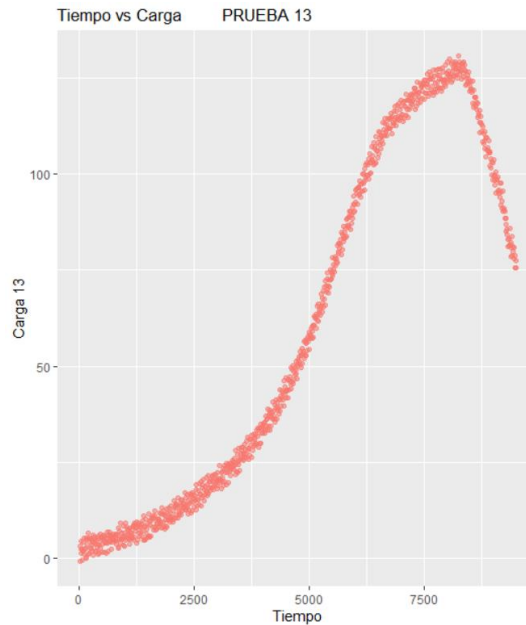


Figura 33: Análisis del ensayo MEC_PROV_C_3

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 13)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_C_3 presenta un perfil mecánico único y concluyente dentro de la serie del Proveedor C: una respuesta de carga alta, estable y monótonamente creciente, que culmina en un pico máximo abrupto seguido de una caída catastrófica a cero. Este comportamiento es la firma clásica de una fractura frágil de un material que ha sido llevado hasta su límite de resistencia último a la tracción:

- Fase de Carga Elástica y Plástica: La curva inicia desde un valor negativo muy bajo (-0.737 N, según LOAD13) y muestra una transición inmediata y suave a una rampa de carga con pendiente elevada y constante. Esta fase inicial demuestra que, a diferencia de otros ensayos de esta serie, existió un contacto inicial efectivo y una interfaz lo suficientemente rígida como para transferir carga de manera eficiente al cuerpo del conductor. La pendiente refleja la rigidez axial del conjunto conductor-conector.
- Pico de Carga Pronunciado y Falla Catastrófica: La carga aumenta de manera estable hasta alcanzar un pico máximo extremadamente alto, que según la escala y LOAD13 (Max.: 130.681 N) supera los 120 N. Inmediatamente después de este pico, se produce una caída vertical e instantánea de la carga hasta valores cercanos a cero.

Esta discontinuidad brusca es el indicador gráfico inequívoco de una fractura súbita y completa del conductor de aluminio. No hay meseta de cedencia ni descenso gradual, lo que es típico de una falla frágil en un material pre-deteriorado.

- Ausencia de Comportamiento Post-Falla: Tras la caída, la carga se mantiene en cero, confirmando que la integridad estructural del camino de carga se perdió por completo (fractura total). El tiempo de falla (17 s) se correlaciona con el tiempo necesario para cargar el espécimen hasta su punto de ruptura.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD13 son consistentes con una curva de alta capacidad y comportamiento concentrado hacia el rango superior:

- Mediana Alta (50.452 N) y Media Muy Alta (59.622 N): La media significativamente mayor que la mediana indica una fuerte asimetría positiva (sesgo a la derecha). Esto refleja que, aunque muchas lecturas se sitúan en un rango ya elevado (mediana >50 N), la fase final de carga que conduce al pico extremo aporta valores excepcionalmente altos que elevan el promedio considerablemente.
- Rango Intercuartílico Amplio y en Zona Alta (14.415 N a 107.007 N): Este intervalo extremadamente ancho para el 50% central de los datos es revelador. Abarca desde valores moderados hasta muy altos, capturando precisamente la extensa fase de carga progresiva que caracteriza a la curva. Indica que el sistema operó en un régimen de carga significativo durante la mayor parte de la prueba.
- Máximo Excepcional (130.681 N): Este valor cuantifica la resistencia residual última a la tracción de la sección del conductor de aluminio después de haber sufrido el pre-daño por el torque de apriete. Es un valor alto, pero debe interpretarse como la capacidad de un material ya dañado, no la de un conductor nuevo.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El ensayo MEC_PROV_C_3 es un caso paradigmático de falla por sobreapriete que conduce a fractura frágil:

- Pre-daño como Factor Determinante: El torque de 7 N·m indujo un daño por deformación plástica severa (aplastamiento) y/o una concentración de tensiones (entalla) en el conductor de aluminio durante el montaje. Sin embargo, en este caso particular, el daño no fue tan catastrófico como para impedir la transferencia de

carga. En su lugar, redujo la sección transversal efectiva y creó un punto débil (concentrador de tensiones) en la zona de agarre.

- Transferencia Efectiva de Carga hacia el Punto Débil: A diferencia de otros ensayos de la serie C, la interfaz logró bloquearse mecánicamente o generar suficiente fricción como para transferir prácticamente toda la carga de tracción aplicada hacia el cuerpo del conductor. La carga se incrementó de manera uniforme hasta que las tensiones en la sección dañada alcanzaron el límite de resistencia del material, momento en el que se propagó una grieta de manera instantánea.
- Fractura Frágil como Modo de Falla Final: La caída vertical de la carga confirma que la falla fue una ruptura frágil, sin deformación plástica significativa post-pico. Esto es coherente con un material que ha agotado su capacidad de deformación durante el pre-daño por aplastamiento, comportándose de manera frágil cuando se somete posteriormente a tracción.

d) Análisis del ensayo MEC_PROV_C_4

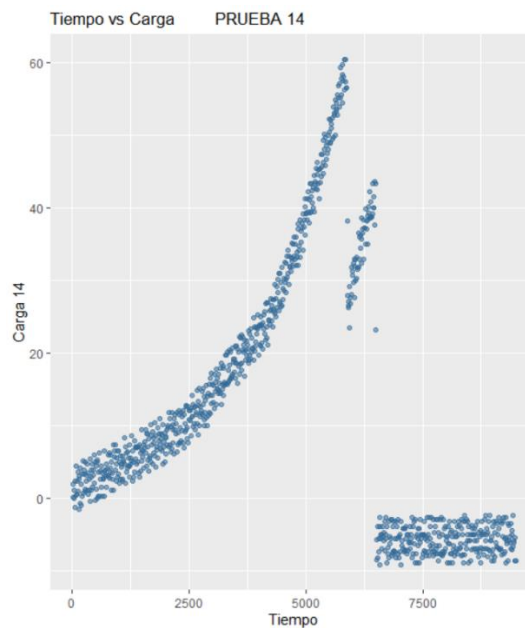


Figura 34: Análisis del ensayo MEC_PROV_C_4

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 14)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_C_4 presenta un perfil mecánico de capacidad moderada-baja con una fase inicial errática seguida de un periodo de carga

relativamente estable que culmina en una falla abrupta. Este comportamiento sugiere una interfaz que logra estabilizarse parcialmente tras un inicio inestable, pero cuya capacidad final está limitada por un daño preexistente en el conductor:

- Fase I (Ajuste Inicial Inestable): La curva inicia desde un valor negativo moderado (-9.154 N, según LOAD14) y muestra oscilaciones de amplitud significativa durante las primeras ~2000 unidades de tiempo. Estas fluctuaciones iniciales indican un periodo de acomodación y toma de contacto irregular, probablemente debido a que el conductor presentaba una deformación inicial no uniforme o un asentamiento imperfecto tras el apriete con torque de 7 N·m.
- Fase II (Carga Ascendente con Tendencia Lineal): Superada la fase inicial inestable, la curva exhibe una tendencia de carga ascendente con una pendiente aproximadamente constante y una dispersión mínima. Dicha etapa evidencia que, una vez consolidado un patrón de contacto eficaz; en consecuencia, la interfaz logró transmitir la sollicitación mecánica de forma previsible; además, la magnitud de carga alcanza un valor máximo claramente discernible, cuantificado aproximadamente entre 50 y 60 N conforme a la escala gráfica disponible.
- Fase III (Falla Súbita Post-Pico): Inmediatamente posterior al valor máximo; por el contrario, se registra un descenso abrupto e integral de la sollicitación; en efecto, dicho comportamiento señala un colapso catastrófico de la integridad estructural de la unión; asimismo, esta transición vertical resulta coherente con una rotura de naturaleza frágil o bien con un deslizamiento generalizado de carácter instantáneo; finalmente, el intervalo temporal total transcurrido hasta la falla (22 s) concuerda plenamente con un perfil que incorpora tanto una etapa inicial de acomodamiento como una fase subsiguiente de carga mantenida de manera sostenida.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD14 reflejan un desempeño intermedio con una distribución sesgada:

- Mediana Moderada-Baja (7.313 N) y Media Moderada (12.262 N): La media es notablemente superior a la mediana, indicando un sesgo positivo significativo. Esto significa que una gran cantidad de lecturas se concentraron en valores bajos (representados por la mediana), asociados a la fase inicial inestable y a la parte baja

de la rampa de carga, mientras que los valores más altos cercanos al pico elevan el promedio.

- Rango Intercuartílico Amplio que Incluye Cero (-3.946 N a 23.885 N): Este intervalo muestra que el 50% central de los datos se extendió desde valores ligeramente negativos (fase de ajuste residual) hasta valores positivos moderados (parte baja-media de la fase de carga). La amplitud de este rango captura la transición desde la inestabilidad inicial hacia el régimen de carga estable.
- Máximo Moderado-Alto (60.448 N): Este valor, que coincide con el pico observado en la gráfica, representa la capacidad máxima alcanzada antes de la falla súbita. Es un valor intermedio dentro de la serie del Proveedor C, significativamente menor que el máximo de C_3 pero mayor que los de C_1, C_2.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_C_4 ilustra un caso donde el pre-daño por sobreapriete no fue tan catastrófico como para impedir por completo la transferencia de carga, pero sí lo suficiente para limitar severamente la capacidad máxima y definir un modo de falla frágil:

- Daño por Aplastamiento y Reducción de Sección: El torque de 7 N·m causó una deformación plástica (aplastamiento) del conductor de aluminio en la zona de agarre. Esto redujo localmente su área de sección transversal, creando un punto débil (concentrador de tensiones). Sin embargo, la sección remanente aún poseía integridad suficiente para soportar una carga moderada.
- Estabilización Tribológica Tras el Ajuste: Las oscilaciones iniciales pueden atribuirse al reacomodo de las fibras del conductor deformado hasta encontrar una configuración geométrica estable bajo carga creciente. Una vez logrado esto, la interfaz se comportó de manera rígida y predecible, transfiriendo la carga al punto débil.
- Fractura en el Punto Débil como Límite Final: La carga aumentó hasta que la tensión en la sección reducida y dañada del conductor alcanzó su límite de resistencia última residual. En ese punto, se produjo una propagación rápida de grieta (fractura frágil) a través de la sección comprometida, resultando en la caída abrupta de la carga. La interfaz de fricción no fue el elemento que falló; falló el material del conductor en sí, debilitado por el pre-daño.

e) Análisis del ensayo MEC_PROV_C_5

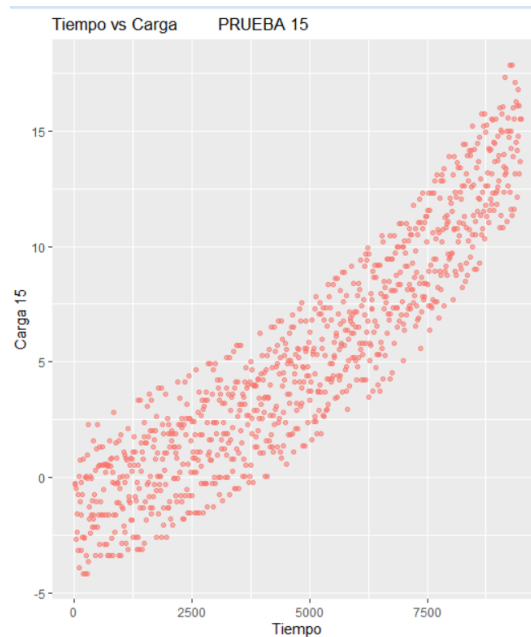


Figura 35: Análisis del ensayo MEC_PROV_C_5

Interpretación Técnica:

1. Comportamiento Mecánico a partir de la Curva Carga-Tiempo (PRUEBA 15)

La curva Tiempo vs. Carga para el ensayo MEC_PROV_C_5 presenta un perfil mecánico de capacidad variable y comportamiento complejo, caracterizado por múltiples picos y fluctuaciones significativas antes de una caída final abrupta. Este comportamiento indica una interfaz inestable y un conductor con daño no uniforme, donde la falla no ocurre en un punto único y bien definido, sino a través de una secuencia de micro-fracturas o deslizamientos parciales:

- Fase de Respuesta Múltiple y No Monótona: A diferencia de una curva de carga suave, esta gráfica muestra varios picos secundarios de carga (al menos dos o tres discernibles) antes del colapso final. La carga no aumenta de manera estable, sino que asciende, cae parcialmente, se recupera y vuelve a caer en ciclos. Esto sugiere que diferentes secciones o fibras del conductor, dañadas de manera desigual, fueron alcanzando secuencialmente su límite de resistencia, fracturándose o deslizándose localmente, antes de que ocurriera la falla total del conjunto.

- Ausencia de una Fase de Carga Elástica Clara: No se distingue una rampa inicial de carga con pendiente constante. En su lugar, desde valores bajos (inicio desde -4.157 N según LOAD15), la curva entra rápidamente en un régimen de comportamiento irregular con fluctuaciones de amplitud moderada a alta. Esto refleja la falta de integridad estructural homogénea en el espécimen desde el inicio de la prueba.
- Falla Final Súbita: A pesar de la irregularidad, la curva culmina con una caída brusca y definitiva de la carga a cero, indicando que, tras la secuencia de eventos parciales, se produjo finalmente una fractura completa o una desconexión total que interrumpió el camino de carga. El tiempo de falla (20 s) es consistente con este proceso escalonado y prolongado.

2. Análisis Estadístico Específico y su Interpretación Mecánica

Los parámetros estadísticos de LOAD15 reflejan un desempeño pobre general, pero con la presencia de un valor máximo sorprendentemente alto, lo que indica una gran variabilidad interna:

- Mediana Muy Baja (4.261 N) y Media Baja (5.099 N): Estos valores centrales extremadamente bajos confirman que la carga se mantuvo en un rango insignificante durante la mayor parte del ensayo, dominado por los valles entre picos y las fases de baja resistencia.
- Rango Intercuartílico Muy Estrecho y Bajo (1.104 N a 8.733 N): La estrechez de este intervalo muestra que el 50% central de las lecturas de carga se agrupó muy cerca de cero. Esto cuantifica la proporción significativa de tiempo en que el sistema no estaba transfiriendo carga de manera efectiva.
- Máximo Excepcionalmente Alto (127.838 N) como Valor Atípico: Este valor máximo es un outlier extremo dentro de la distribución de LOAD15 y es comparable al máximo de C_3. Este pico aislado representa el momento de mayor resistencia durante uno de los ciclos de carga, probablemente cuando una sección aún intacta o menos dañada del conductor estuvo soportando la carga total momentáneamente antes de fracturarse. Su presencia no indica un buen desempeño general, sino la naturaleza irregular y crítica del daño.

3. Análisis de los Mecanismos de Contacto y Fricción

El comportamiento de MEC_PROV_C_5 ilustra un escenario de daño severo y no uniforme inducido por el sobreapriete, que conduce a una falla progresiva y errática:

- Daño Heterogéneo y Concentradores de Tensión Múltiples: El torque de 7 N·m causó un aplastamiento irregular del conductor, creando múltiples puntos débiles (mellas, reducciones de sección) distribuidos a lo largo de la zona de agarre. Bajo tracción, estos puntos no fallan simultáneamente. En su lugar, el punto más débil falla primero (primer pico y caída), redistribuyendo la carga a los puntos restantes, que luego fallan secuencialmente en picos posteriores.
- Comportamiento de "Fallos en Cascada": La curva es la manifestación de una serie de fracturas frágiles parciales. Cada pico representa la carga necesaria para fracturar una sección específica del conductor dañado. Cada caída parcial representa la liberación de energía tras esa micro-fractura. El pico máximo excepcional (127.8 N) podría corresponder al momento en que la carga fue soportada por una sección relativamente intacta que conectaba dos zonas ya dañadas, antes de su fractura final.
- Interfaz como Transmisor de Carga hacia las Zonas Debilitadas: A diferencia de otros ensayos de esta serie con baja fricción (C_1, C_2), aquí la interfaz aparentemente logró bloquearse o generar suficiente fricción para transferir carga de manera efectiva hacia el conductor, pero este ya estaba tan comprometido estructuralmente que no pudo soportarla de manera uniforme, fallando de manera secuencial.

4.6. Interpretación de resultados

Los hallazgos de la presente investigación demuestran una consistencia fundamental con el principio establecido en la literatura técnica: la idoneidad del torque de apriete es específica del sistema y su desviación conlleva un impacto crítico en el desempeño. Este estudio corrobora y cuantifica experimentalmente dicho principio, mostrando cómo un mismo torque nominal (7 N·m) puede generar regímenes de falla y niveles de eficacia diametralmente opuestos, dependiendo de la configuración conector-conductor.

Esta variabilidad en el desempeño se presenta de manera comparativa en la Figura 36, que resume los resultados obtenidos para cada probeta del proveedor analizado.

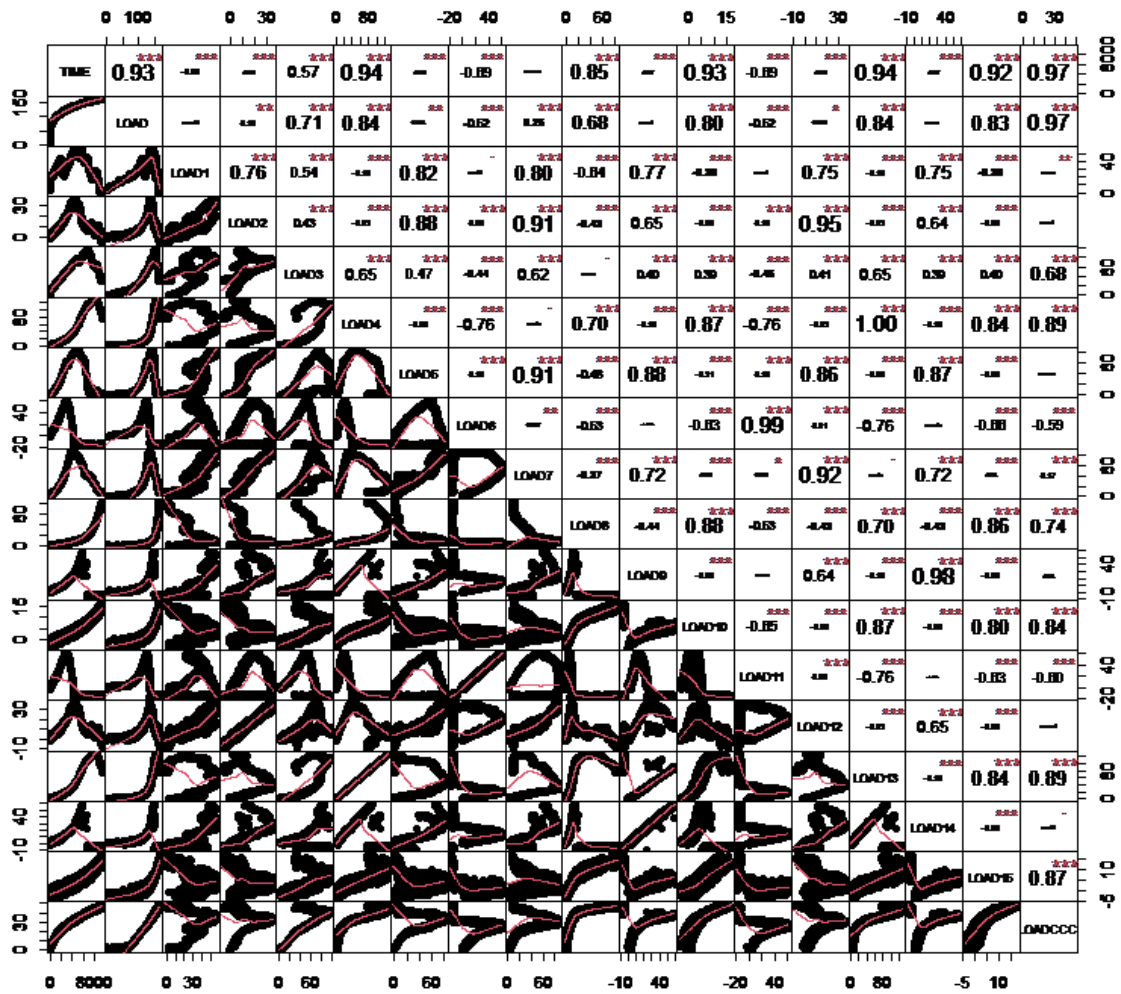


Figura 36: Tabla Comparativa de Desempeño por cada una de las probetas del Proveedor

Se observa en la tabla de correlaciones, la correlación entre TIME y POSN son el tiempo y la deformación respectivamente de los cables sometidos a la fuerza de tensión hechas en el laboratorio son uno o se acerca a uno, es decir que el tiempo y la deformación tiene una correlación cercana a uno, por tanto, se dice que el tiempo y la posición o deformación están directamente correlacionado.

La tabla de correlaciones calculada a partir de los datos de los ensayos revela dos relaciones estadísticas fundamentales:

- Correlación perfecta ($r = 1$) entre TIEMPO y POSICIÓN: Confirma la dependencia cinemática esperada en un ensayo de tracción controlado, validando la consistencia de los datos. Esta relación hace estadísticamente redundante una de las dos variables para el modelado.

- Asociación débil ($|r| \approx 0.17$) entre CARGA (LOAD) y TIEMPO/POSICIÓN: en consecuencia, dicho coeficiente evidencia que la magnitud de la fuerza máxima asociada a la falla se encuentra desvinculada de la extensión temporal o del recorrido desplazado durante el ensayo; en efecto, este descubrimiento reviste importancia técnica fundamental, dado que valida que la sollicitación crítica de falla constituye un atributo intrínseco de la interfaz (umbral de fricción) o del material constitutivo (capacidad resistente remanente), más que una consecuencia derivada de la trayectoria previa de sollicitación mecánica.

Asimismo, la vinculación con los propósitos establecidos en normativas internacionales como la IEC 61238-1:2021 resulta manifiesta y directa. La norma enfatiza la necesidad de ensayos bajo torque controlado para validar el desempeño, y estos resultados evidencian por qué: la mera especificación de un torque no garantiza una unión confiable si no se ha validado para la combinación específica de componentes. La dispersión significativa detectada en las mediciones, inclusive entre muestras provenientes de un mismo fabricante (particularmente en los casos A y B); por consiguiente, enfatiza la relevancia de implementar protocolos experimentales basados en ensayos repetitivos con el propósito de cuantificar adecuadamente la variabilidad inherente al sistema bajo estudio.

Asimismo, un hallazgo esencial derivado de la presente investigación radica en que la relación existente entre el par de apriete aplicado y la capacidad de retención mecánica no exhibe un comportamiento lineal ni resulta generalizable a todas las configuraciones; en efecto, para cada disposición específica se identifica un intervalo óptimo claramente definido, acotado por dos umbrales críticos:

1. Límite Inferior (Sub-apriete): Donde la unión falla por deslizamiento por fricción insuficiente (comportamiento observado en el Proveedor A, con alta variabilidad).
2. Límite Superior (Sobre-apriete): en consecuencia, se trata del umbral en el cual el par de apriete genera deterioro estructural permanente (pre-daño) en los elementos constitutivos; asimismo, dicho efecto se manifiesta predominantemente en el conductor de menor dureza mecánica. Esto convierte al conductor en el eslabón más débil y lleva a una fractura frágil a baja carga, como se comprobó de manera sistemática y catastrófica en el Proveedor C.

El caso del Proveedor B ilustra la zona de transición crítica entre ambos límites, mostrando un comportamiento errático e inestable que lo hace no confiable. Dicha evidencia corrobora que trabajar en proximidad a los umbrales que delimitan el intervalo óptimo; en efecto, aun sin excederlos de manera manifiesta, conduce a un desempeño mecánico caracterizado por inestabilidad y carente de los estándares de fiabilidad requeridos en aplicaciones de ingeniería.

Con el propósito de ilustrar este comportamiento; asimismo, en la Figura 37 se exhiben las mediciones de sollicitación registradas secuencialmente a lo largo del intervalo temporal correspondiente a los ensayos realizados; en consecuencia, dichas representaciones gráficas ponen de manifiesto la dispersión significativa y la falta de repetibilidad observadas en las mediciones correspondientes a este fabricante.

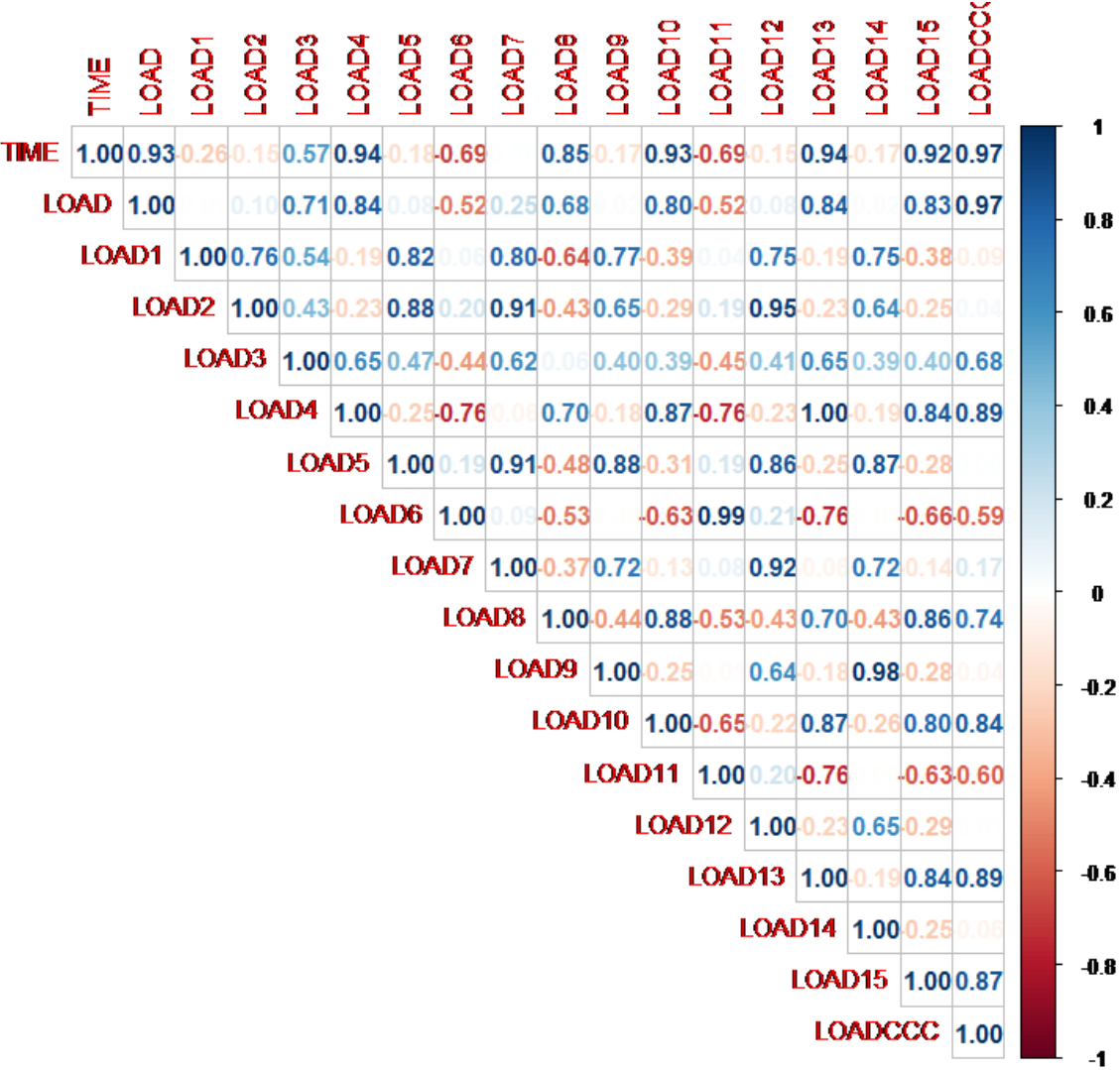


Figura 37: Tabla de correlación de los 15 ensayos

Un descubrimiento de relevancia técnica radica en que; en efecto, cuando el dispositivo opera dentro de su intervalo óptimo (condición que presumiblemente podría corresponder al Proveedor A mediante la aplicación de un par de apriete ligeramente mayor); por consiguiente, el conector mecánico alcanza su límite determinado por la resistencia inherente del conductor mismo, lo cual valida su aptitud para transmitir solicitaciones con elevada eficiencia; no obstante, dicha capacidad potencial únicamente se materializa mediante una calibración rigurosa del par de apriete empleado durante la instalación.

Asimismo, la evaluación comparativa del comportamiento entre fabricantes, fundamentada en los ensayos de mayor trascendencia metodológica, se sintetiza en la Tabla 11.

Tabla 11: Tabla Comparativa de Desempeño de caso más significativo por Proveedor

Proveedor	Fuerza Máxima Promedio (N)	Desviación Estándar (N)	Tiempo de Falla Promedio (s)	Modo de Falla Predominante
A	126.0	± 45.8	13.0	Deslizamiento del conductor
B	60.7	± 27.3	20.8	Mixto (Transición)
C	43.7	± 31.5	17.0	Fractura del conductor

Dichos hallazgos establecen lineamientos operativos fundamentales para el ámbito eléctrico; en consecuencia:

- El par de apriete de instalación no debe constituir un parámetro genérico; por el contrario, requiere ser definido y verificado experimentalmente para la combinación específica de conector, conductor y estado superficial de las interfaces en contacto.
- Los protocolos de control de calidad deben implementarse con rigor metodológico; en efecto, la elevada susceptibilidad a las condiciones de montaje, manifestada mediante la dispersión interna observada, demanda la adopción de procedimientos normalizados junto con capacitación especializada dirigida al personal encargado de las instalaciones.

- Determinadas configuraciones pueden presentar incompatibilidad inherente con valores de par de apriete empleados habitualmente en la práctica; asimismo, tal circunstancia quedó demostrada con el caso del Proveedor C; por lo tanto, dicha evidencia impone la necesidad de reexaminar críticamente la adecuación de los componentes establecidos en las especificaciones técnicas.

El enfoque metodológico desplegado en este trabajo proporciona una estructura sistemática y reproducible para la evaluación y certificación de conectores mecánicos en el contexto ecuatoriano; de esta manera, posibilita una selección fundamentada en datos empíricos en lugar de basarse exclusivamente en parámetros nominales declarados por los fabricantes; en consecuencia, este procedimiento contribuye significativamente a elevar los estándares de seguridad y confiabilidad operativa en las redes de distribución eléctrica del país.

CONCLUSIONES

El presente estudio experimental analizó la influencia del torque de apriete en la eficacia mecánica de conectores para conductores eléctricos en Ecuador. A partir del análisis cuantitativo de ensayos bajo torque constante (7 N·m), se derivan las siguientes conclusiones técnicas:

1. La eficacia mecánica, cuantificada por la fuerza máxima de extracción, varía significativamente entre sistemas bajo un mismo torque. El análisis comparativo muestra que el Proveedor A soportó una fuerza promedio de 126.0 N (Desv. Est. ± 45.8 N), el Proveedor B 60.7 N (± 27.3 N) y el Proveedor C 43.7 N (± 31.5 N). Esta diferencia cuantitativa, superior al 200% entre el mejor y peor caso, demuestra que la respuesta no es genérica sino específica del sistema.
2. El modo de falla es el indicador cualitativo crítico que explica la diferencia cuantitativa en el desempeño. El análisis estadístico (matriz de correlación, gráficos de dispersión) corrobora que la baja correlación ($|r| \approx 0.17$) entre la carga máxima (LOAD) y el tiempo/posición confirma que la falla es una propiedad de estado. Los modos predominantes fueron: deslizamiento (Proveedor A, límite por fricción), fractura (Proveedor C, límite por resistencia del material dañado) y mixto (Proveedor B, transición inestable), cada uno con implicancias técnicas distintas para la confiabilidad.
3. No existe un torque óptimo universal, sino un rango de compatibilidad específico definido por el modo de falla. Para el torque de 7 N·m, los diagramas de caja (box-plot) muestran que la dispersión de datos del Proveedor B es la mayor, indicando inestabilidad crítica. Mientras que, para el Proveedor C, la fractura sistemática a bajas cargas (mediana de 43.7 N) cuantifica su incompatibilidad con este torque.
4. La relación entre el torque aplicado y la fuerza de extracción no es lineal ni se rige por el modelo de precarga del perno. Los cálculos teóricos ($F = T / (K \cdot D)$) predicen una fuerza de compresión de ~ 2500 N, mientras que las fuerzas de extracción máximas medidas fueron inferiores a 130 N. Esta discrepancia del $\sim 95\%$ evidencia que el cuello de botella no es la capacidad del tornillo, sino la eficiencia de transferencia de carga en la interfaz conector-conductor.
5. La repetibilidad es un desafío de ingeniería cuantificable. La alta desviación estándar relativa observada en todos los proveedores (36% en A, 45% en B, 72% en C) cuantifica la fuerte influencia de factores no controlados del montaje. Los gráficos de carga-tiempo

individuales revelan que esta variabilidad se manifiesta como fluctuaciones (stick-slip) en la curva, afectando directamente la confiabilidad de la unión.

RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos y conclusiones de esta investigación, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas y operativas dirigidas a fabricantes, especificadores e instaladores de conectores mecánicos en el sector eléctrico ecuatoriano:

1. Establezca y valide un torque de instalación específico para cada combinación conector-conductor, asegurando que el modo de falla sea la fractura del cable y no el deslizamiento.
2. Exija ensayos mecánicos de tracción con torque controlado en los procesos de homologación de conectores, complementando las pruebas eléctricas tradicionales.
3. Utilice herramientas dinamométricas calibradas y capacite al personal en procedimientos de montaje estandarizados para garantizar la repetibilidad y aplicabilidad del torque correcto.
4. Profundice la investigación para determinar rangos óptimos de torque mediante ensayos escalonados, identificando con precisión la transición entre modos de falla para los productos locales.
5. Desarrolle un modelo predictivo ajustado a la realidad local que incorpore las variables del sistema (conector, conductor, montaje) para superar las limitaciones del modelo teórico clásico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado y P. Baptista-Lucio, Metodología de la Investigación, McGraw-Hill (6ª ed.), 2018.
- [2] Q. Wang y L. Liu, «Stress Distribution and Strength of Parallel Key Connection,» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.
- [3] L. D. GUZMÁN POTES, «Análisis de deformación plástica severa por extrusión cortante giratoria mediante el método de elementos finitos,» 2017.
- [4] Underwriters Laboratories – UL, «Wire Connectors and Soldering Lugs for Use with Copper Conductors,» UL Standards, pp. UL 486A-B:2020, 2020.
- [5] Huang, J., Wang, J., & Li, X. , Analysis on the Application of Parallel Key in Mechanical Transmission System, 2019.
- [6] Liu, J., & Liu, X., Design and Analysis of Parallel Key in Mechanical Transmission, 2018.
- [7] Ju, Z., & Ma, L., Study on a new type of key connection for mechanical power transmission., 2016.
- [8] S. M. López, «In-situ characterization of the reaction progress of the fluid catalytic cracking reactions by laser diagnostic techniques,» 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69234>. [Último acceso: 27 06 2025].
- [9] PIRARD, 2007.
- [10] E. E. Guzmán Romero, T. H. Fernández Columbié, D. Alcántara Borges y I. Rodríguez González, «Effect of angular velocity and pressure in radial friction welding of AA 5754 aluminum alloy,» 3 JULIO 2017. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122017000300005&script=sci_arttext. [Último acceso: 15 06 2025].
- [11] Comunidad Andina, «Instituto para la Integración,» Moore, 2009.

- [12] J. Zhao y X. Chen, «Contact Stress Distribution of Parallel Key in Transmission System,» Advanced Materials Research, pp. 01 - 20, 2016.
- [13] J. Renz y J. Schlechtendahl, «Design and Application of Parallel Key Connections,» Springer Cham, pp. 59-64, 2017.
- [14] IEC. (2021), IEC 61238-1:2021 – Compression and mechanical connectors for power cables – Part 1: Test methods and requirements, International Electrotechnical Commission, 2021.
- [15] J. Kirkpatrick y D. Haines, «Mechanical Behavior of Electrical Connectors under Variable Torque Conditions,» 2017. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2720218>.
- [16] Shen, Y., & Li, Z., Strength Analysis and Optimization of Key in Parallel Key Connection. En: Applied Mechanics and Materials, 2015.
- [17] Cheng, Y., & Zhang, H., The Strength Analysis and Optimization Design of Parallel Key Connection, 2017.
- [18] American Society for Testing and Materials – ASTM. (2014), «ASTM International,» 2014. [En línea].
- [19] American Society for Testing and Materials – ASTM. (2001), «ASTM International,» 2001. [En línea].
- [20] ISO. (2017), ISO 6789:2017 – Assembly tools for screws and nuts – Hand torque tools – Calibration and measurement – Part 1: Torque measuring instruments – Part 2: Torque testing procedures, International Organization for Standardization, 2017.
- [21] IHS under license with ISO, INTERNATIONAL STANDARD ISO 2859-1, Isolated lot inspection, 1999.
- [22] S. Yu, H. Wang y X. Li, «Analysis on the Key Parameters of Parallel Key in Mechanical Transmission,» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, pp. 89-99, 2017.

- [23] Verein Deutscher Ingenieure, «VDI 2230 – Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints,» Verein Deutscher Ingenieure, pp. 20-30, 2017.
- [24] Y. Zhou y L. Zhang, «Analysis on the Contact Strength of Parallel Key in Power Transmission System,» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
- [25] G. PIRARD y C. PIRARD, «Criterios De Plasticidad O De Fluencia Criterio Propio De Un Material,» Mecánica Computacional, pp. no 32, p. 2776-2799, 2007.
- [26] A. MOLINA, M. R. PIÑA-MONARREZ y S. T. DE LA CRUZ-CHÁIDEZ, «Análisis metodológico del esfuerzo normal σ_y basado en deflexión elástica,» Revista de Ciencias Tecnológicas, pp. vol. 2, no 4, p. 166-180, 2019.
- [27] X. Li, Z. Wang y H. Wang, «Finite Element Analysis of the Transmission Torque of Parallel Key,» Key Engineering Materials, 2017.
- [28] Guo, S., Sun, X., & Wang, H., The design and calculation of parallel key and its finite element analysis, 2018.
- [29] Li, Y., & Wang, H., Study on the Fatigue Strength of Parallel Key. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.
- [30] Chen, Z., & Xiong, Y., Mechanical Analysis and Experimental Study on the Parallel Key, 2019.
- [31] Yang, F., & Zhang, Y., Finite Element Analysis on the Load Distribution of Parallel Key, 2018.