

APUNTES DEL MÓDULO 1

Principios de la electricidad y riesgos eléctricos

Protocolos de seguridad eléctrica bajo estándar NFPA 70E

Material de estudio

Módulo 1

Contenido del módulo

- 1 Fundamentos de la electricidad: Entendiendo el riesgo
- 2 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica: Lo que sucede en tu cuerpo
- 3 Marco normativo: NFPA 70E y legislación chilena para la seguridad eléctrica
- 4 Choque eléctrico y arco eléctrico: Mecanismos y devastadoras consecuencias
- 5 Energía incidente y etiquetas de advertencia de arco eléctrico: Tu guía para la protección
- 6 Límites de aproximación y riesgos específicos en sistemas de corriente continua

¡Bienvenido a este módulo fundamental sobre **Principios de la electricidad y riesgos eléctricos!**

En el sector industrial, la electricidad es una herramienta poderosa e indispensable, pero también una fuente de riesgos significativos si no se comprende y maneja correctamente. Nuestro objetivo en este módulo es que identifiques a fondo los principios que rigen la electricidad y, crucialmente, los peligros asociados con el choque eléctrico y el arco eléctrico, siempre en conformidad con el estándar internacional NFPA 70E y los protocolos de seguridad de tu organización. Prepárate para adquirir el conocimiento esencial que te permitirá trabajar de manera segura y proteger tu vida y la de tus compañeros.

1 Fundamentos de la electricidad: Entendiendo el riesgo

Imagina que hoy estamos en una planta manufacturera, listos para intervenir un tablero de distribución de 380V. Antes de cualquier contacto, es vital que comprendas los principios eléctricos que definen el riesgo. La electricidad no es un misterio, sino un fenómeno gobernado por leyes físicas que, al conocerlas, nos permiten anticipar y mitigar peligros.

- **Tensión o Voltaje (V):** Es la 'fuerza' o diferencia de potencial eléctrico que impulsa el movimiento de cargas. Piensa en ella como la presión del agua en una manguera. Cuanto mayor sea la tensión, mayor será la 'presión' para que la corriente circule.
- **Corriente (I):** Es el flujo real de electrones a través de un conductor o, peligrosamente, a través de tu cuerpo. Se mide en amperes (A) y es la magnitud que directamente causa daño fisiológico. Si el voltaje es la presión, la corriente es el caudal de agua.
- **Resistencia (R) o Impedancia (Z):** Es la oposición que un material presenta al paso de la corriente. Se mide en ohmios (Ω). Tu cuerpo tiene resistencia, y esta varía significativamente. Una baja resistencia corporal, por ejemplo, debido a la humedad, permitirá que una mayor corriente fluya.

Estos tres factores están intrínsecamente relacionados por la **Ley de Ohm: $V = I \times R$** . Esta fórmula es fundamental para entender que, a mayor tensión aplicada o menor resistencia en el circuito (incluido tu cuerpo), mayor será la corriente que circule, incrementando drásticamente el riesgo de lesión o muerte.

Es importante diferenciar entre la **corriente alterna (CA)**, donde la dirección del flujo de electrones cambia periódicamente (comúnmente a 50 o 60 Hz en Chile), lo que provoca contracciones musculares repetidas; y la **corriente continua (CC)**, donde el flujo es unidireccional, presentando riesgos específicos como quemaduras sostenidas y la electrólisis de tejidos. La **potencia eléctrica ($P = V \times I$)** representa la energía transferida por unidad de tiempo y es clave para entender la capacidad destructiva de un incidente eléctrico, mientras que la **capacidad de cortocircuito** de una instalación indica la corriente máxima disponible en una falla, un parámetro crítico para evaluar los riesgos de arco eléctrico.

El cuerpo humano no es un aislante perfecto; su resistencia es variable (entre 1.000 y 100.000 Ω) dependiendo de factores como la humedad de la piel, el área de contacto y la trayectoria que sigue la corriente. Para dimensionar el peligro, considera que a 220V, con una resistencia corporal de solo 1.000 Ω , la corriente que podría atravesar tu cuerpo alcanzaría los 220 mA, un nivel que se considera letal debido a la fibrilación ventricular.



Un trabajador calificado revisa atentamente una etiqueta de advertencia de arco eléctrico en un tablero, destacando la importancia de esta información para su seguridad.

✓ Puntos clave

- La tensión es la 'fuerza' que impulsa la corriente.
- La corriente es el flujo de electrones y es la que causa daño fisiológico directo.
- La resistencia u oposición al flujo de corriente es un factor clave en la Ley de Ohm ($V=I \times R$).
- La corriente alterna (CA) y continua (CC) presentan riesgos diferenciados.
- La resistencia del cuerpo humano es variable y determina la magnitud del peligro.

💡 Para reflexionar

- ¿Cómo influye la humedad de la piel en el riesgo de choque eléctrico según la Ley de Ohm?
- Si trabajas en un sistema de corriente continua, ¿qué tipo de efectos fisiológicos específicos debes prever y cómo difieren de los de corriente alterna?
- En tu lugar de trabajo, ¿qué información sobre tensión y corriente disponible en los equipos es relevante para evaluar el riesgo eléctrico inicial?

2

Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica: Lo que sucede en tu cuerpo

Mientras observamos ese tablero de 380V, es crucial entender qué ocurre internamente cuando la corriente atraviesa el cuerpo humano. Hay una máxima en seguridad eléctrica: **no es el voltaje lo que mata, es la corriente**. Los efectos fisiológicos varían desde una leve sensación de hormigueo hasta el paro cardíaco fulminante, dependiendo de factores como la magnitud de la corriente, la duración del contacto, la frecuencia y la trayectoria que toma la corriente a través del cuerpo.

La corriente alterna de 50-60 Hz, común en instalaciones industriales y domésticas, es particularmente peligrosa porque interfiere directamente con el sistema nervioso y muscular del cuerpo, provocando contracciones incontrolables.

omb>

Corriente (mA)	Efecto fisiológico
0,5 – 1	Umbral de percepción (ligero cosquilleo)
5 – 10	Dolor, contracción muscular leve, control muscular aún posible
10 – 30	Tetanización muscular (incapacidad de soltar el conductor)
30 – 75	Paro respiratorio, inconsciencia, riesgo de fibrilación ventricular
75 – 100+	Fibrilación ventricular (desorganización del ritmo cardíaco, mortal sin desfibrilación inmediata)
> 200	Quemaduras internas graves, daño tisular masivo, efectos neurológicos severos

La **tetanización** es un efecto especialmente insidioso: la contracción muscular sostenida causada por la corriente impide a la víctima soltar el conductor energizado, prolongando la exposición y aumentando exponencialmente el daño. La **fibrilación ventricular**, por otro lado, es la desorganización del ritmo normal del corazón, impidiendo que bombee sangre eficazmente, lo que lleva a la muerte si no se actúa con desfibrilación de emergencia en minutos.

La trayectoria que toma la corriente por el cuerpo es un factor crítico. Una trayectoria mano-mano o mano-pie que atraviesa el área del corazón es considerada la más letal. Además, la duración de la exposición es clave; incluso corrientes relativamente bajas pueden ser mortales si el contacto se prolonga más allá de un segundo.

✓ Puntos clave

- La corriente, no el voltaje, es la principal causa de daño fisiológico.
- La magnitud, duración, frecuencia y trayectoria de la corriente determinan la gravedad de las lesiones.
- La tetanización muscular impide a la víctima soltar el conductor.
- La fibrilación ventricular es una condición cardíaca mortal causada por la corriente.
- Trayectorias que cruzan el corazón y exposiciones prolongadas son las más peligrosas.

Para reflexionar

- ¿Cómo se relaciona la tetanización muscular con la necesidad de tener procedimientos de rescate claros en el lugar de trabajo?
- Si alguien sufre un choque eléctrico en tu equipo, ¿qué pasos de primeros auxilios críticos, enfocados en los efectos fisiológicos, deben seguirse de inmediato?
- ¿Por qué es fundamental que todo el personal eléctrico conozca los rangos de corriente y sus efectos fisiológicos?

Marco normativo: NFPA 70E y legislación chilena para la seguridad eléctrica

Antes de abrir cualquier equipo eléctrico, debemos recordar que no trabajamos de forma aislada ni bajo criterios personales. La seguridad eléctrica está regida por un sólido marco normativo diseñado para proteger vidas. La norma **NFPA 70E «Standard for Electrical Safety in the Workplace»** es el estándar internacional de referencia, ampliamente reconocido para establecer prácticas de trabajo seguras que resguardan a los trabajadores de los riesgos de choque y arco eléctrico. Su alcance se centra en instalaciones eléctricas en lugares de trabajo, excluyendo las actividades de generación, transmisión y distribución de servicios públicos.

En Chile, este estándar internacional se complementa e integra con una robusta legislación nacional que establece las bases para la seguridad en el trabajo eléctrico:

- **Ley N° 16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales:** Esta ley establece el seguro obligatorio y exige a los empleadores implementar todas las medidas necesarias para prevenir accidentes y enfermedades profesionales, incluyendo los de origen eléctrico.
- **D.S. N° 594 del MINSAL:** Este Decreto Supremo regula las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, incluyendo requisitos específicos sobre la seguridad de las instalaciones eléctricas.
- **D.S. N° 109 del Ministerio de Economía:** Este reglamento se refiere a las instalaciones eléctricas de corrientes fuertes, es decir, de baja y media tensión, estableciendo requisitos técnicos para su diseño, ejecución y mantenimiento.
- **Pliegos RIC de la SEC (Superintendencia de Electricidad y Combustibles):** Estos reglamentos técnicos para instalaciones de consumo eléctrico establecen los requisitos específicos de diseño, montaje, puesta en servicio y mantenimiento de las instalaciones, asegurando la seguridad de las personas y de los bienes.

La NFPA 70E complementa esta normativa con procedimientos detallados para el análisis de riesgo, la selección de equipos de protección personal (EPP), el establecimiento de límites de aproximación seguros y las prácticas de trabajo energizado y desenergizado. Muchas empresas chilenas adoptan la NFPA 70E como una referencia técnica clave para sus propios procedimientos de seguridad eléctrica, demostrando un compromiso con los más altos estándares de protección.



El uso correcto de EPP y herramientas aisladas es fundamental al trabajar cerca de conductores energizados, incluso respetando los límites de aproximación.

✓ Puntos clave

- NFPA 70E es el estándar internacional clave para la seguridad eléctrica en el trabajo.
- La legislación chilena (Ley 16.744, D.S. 594, D.S. 109, Pliegos RIC SEC) establece el marco legal nacional.
- Ambos cuerpos normativos exigen medidas de prevención y procedimientos seguros.
- NFPA 70E detalla el análisis de riesgo, selección de EPP y límites de aproximación.
- El conocimiento y aplicación de estas normas son un deber y un derecho del trabajador.

Para reflexionar

- ¿Cómo se integra la NFPA 70E con la Ley N° 16.744 en la práctica diaria de tu organización?
- ¿Qué documentación interna de tu empresa se basa en los principios de la NFPA 70E o la normativa chilena para trabajos eléctricos?
- Si observas una práctica que incumple el D.S. N° 594 en relación con la seguridad eléctrica, ¿qué acciones debes tomar según tu rol?

Choque eléctrico y arco eléctrico: Mecanismos y devastadoras consecuencias

Ahora que conocemos el marco, profundicemos en los dos grandes riesgos que enfrentamos en trabajos eléctricos. No son riesgos teóricos, sino fenómenos con consecuencias físicas devastadoras y potencialmente letales: el choque eléctrico y el arco eléctrico.

Choque Eléctrico

El choque eléctrico ocurre cuando una persona se convierte en parte de un circuito eléctrico, permitiendo que la corriente fluya a través de su cuerpo entre dos puntos con diferente potencial. Las consecuencias varían según la corriente y duración, como ya hemos visto, pero pueden incluir:

- **Tetanización muscular:** Inmovilización y dificultad para soltar el conductor.
- **Fibrilación ventricular:** Interrupción del ritmo cardíaco normal.
- **Quemaduras internas:** Daño a órganos y tejidos internos por el paso de la corriente.
- **Trauma secundario:** Caídas o golpes resultantes de la descarga.

Arco Eléctrico (Arc Flash)

El arco eléctrico es una descarga explosiva de energía a través del aire ionizado, que ocurre entre conductores o entre un conductor y tierra, sin necesidad de contacto directo. He sido testigo de arcos que vaporizan conductores de cobre y causan quemaduras graves a trabajadores a más de un metro de distancia. Es un fenómeno extremadamente violento y rápido. Típicamente, los arcos eléctricos ocurren durante:

- Cierre o apertura de seccionadores bajo carga.
- Fallas de aislamiento por contaminación, deterioro o error humano.
- Contacto accidental con herramientas o partes conductoras.
- Cortocircuitos en equipos energizados.

Las **consecuencias del arco eléctrico** son múltiples y severas:

- **Energía térmica:** Temperaturas que pueden superar los 19.400°C (cuatro veces la superficie del sol), provocando quemaduras de tercer grado en milisegundos, incluso a distancia.
- **Onda de presión (blast):** Una explosión que puede lanzar al trabajador varios metros, causando traumatismos craneales, lesiones auditivas (ruptura de tímpanos) y daño pulmonar.
- **Proyectiles metálicos:** Fragmentos de conductores, aislamiento y componentes del equipo que se vaporizan y son lanzados a alta velocidad.
- **Luz intensa y ruido:** La luminosidad extrema puede causar ceguera temporal o permanente y daño retiniano, mientras que el ruido puede provocar pérdida auditiva.

La combinación de estos efectos hace de la explosión por arco una de las causas principales de lesiones graves y muertes en el trabajo eléctrico, por lo que su prevención y la protección adecuada son absolutamente prioritarias.

✓ Puntos clave

- El choque eléctrico ocurre por contacto directo y paso de corriente a través del cuerpo.
- El arco eléctrico es una descarga explosiva de energía a través del aire.
- Las consecuencias del choque incluyen tetanización, fibrilación y quemaduras internas.
- El arco eléctrico genera calor extremo, onda de presión, proyectiles y luz intensa.
- Ambos riesgos son potencialmente letales y requieren medidas de prevención rigurosas.

Para reflexionar

- ¿Cuáles son las principales diferencias entre el mecanismo de daño de un choque eléctrico y el de un arco eléctrico?
- ¿Cómo se pueden mitigar los riesgos de proyectiles metálicos y onda de presión en caso de un arco eléctrico en tu área de trabajo?
- Si presencias un arco eléctrico, ¿qué acciones inmediatas debes tomar para protegerte y alertar a otros?

Energía incidente y etiquetas de advertencia de arco eléctrico: Tu guía para la protección

Observa con atención esa etiqueta de advertencia naranja en el tablero eléctrico. No es meramente decorativa; es el resultado de un riguroso **estudio de arco eléctrico** que calcula la cantidad de energía térmica que se liberaría en caso de una falla. Ignorar esta etiqueta es como conducir sin cinturón de seguridad; la información contenida en ella es vital para tu supervivencia.

La **energía incidente** se define como la cantidad de energía térmica por unidad de área (expresada en cal/cm² o J/cm²) que se proyectaría sobre una superficie (como el cuerpo de un trabajador) a una distancia de trabajo específica durante un evento de arco eléctrico. Este valor se calcula considerando varios factores críticos:

- La tensión nominal del sistema.
- La corriente de cortocircuito disponible en el punto de falla.
- El tiempo de despeje de las protecciones (cuánto tarda el disyuntor en abrirse).
- La distancia de trabajo a la que el operario podría estar expuesto.
- La configuración del equipo eléctrico.

La **etiqueta de advertencia de arco eléctrico**, de acuerdo con la NFPA 70E, debe estar presente en todos los equipos eléctricos donde exista riesgo de arco y debe proporcionar información clara y concisa para la seguridad del trabajador. Típicamente, contiene:

- El **Nivel de Energía Incidente** (ejemplo: 8 cal/cm²).
- El **Límite de Protección contra Arco Eléctrico** (AFPB – Arc Flash Protection Boundary), que es la distancia mínima segura desde el equipo energizado sin el EPP resistente al arco adecuado.
- La **Distancia de Trabajo** utilizada para calcular la energía incidente.
- La **Categoría de EPP** requerida (CAT), que va desde 0 hasta 4 según la NFPA 70E, indicando el nivel de protección térmica que debe tener la vestimenta y el equipo de protección.
- La tensión nominal del equipo y el nivel de cortocircuito disponible.
- A menudo, incluye recomendaciones sobre herramientas y equipos de protección específicos.

Este análisis detallado permite seleccionar el **Equipo de Protección Personal (EPP) resistente al arco** adecuado, que puede incluir ropa ignífuga (FR), capuchas, guantes dieléctricos con protectores de cuero, protección facial y otros elementos, diseñados para soportar la energía incidente y proteger al trabajador de quemaduras severas. Trabajar sin consultar esta etiqueta o con un EPP insuficiente te expone a riesgos de quemaduras letales y otras lesiones graves.

✓ Puntos clave

- La energía incidente es la energía térmica proyectada durante un arco eléctrico.
- Se calcula mediante un estudio de arco eléctrico que considera múltiples factores.
- La etiqueta de advertencia de arco eléctrico es crucial para la seguridad.
- Contiene información como energía incidente, límites de aproximación y categoría de EPP.
- El EPP resistente al arco debe seleccionarse basándose en la energía incidente indicada en la etiqueta.

Para reflexionar

- ¿Cómo se asegura tu organización de que todos los equipos eléctricos tengan sus etiquetas de arco eléctrico actualizadas?
- Si encuentras una etiqueta de arco eléctrico ilegible o faltante en un equipo, ¿cuál es el procedimiento de seguridad a seguir antes de cualquier intervención?
- ¿Qué significa para ti, en términos prácticos, que una etiqueta indique una categoría de EPP CAT 2 frente a una CAT 4?

Límites de aproximación y riesgos específicos en sistemas de corriente continua

Para finalizar, y antes de cualquier intervención, es imperativo establecer y respetar los límites de aproximación. Estos límites definen distancias de seguridad alrededor de equipos energizados, protegiéndonos del choque eléctrico y del arco eléctrico. Además, aunque la corriente continua (CC) sea menos común en grandes redes de distribución, presenta riesgos específicos que no deben subestimarse.

Límites de Aproximación

La NFPA 70E establece varios límites de aproximación, que son distancias de seguridad que debemos mantener de las partes energizadas, a menos que estemos calificados y utilicemos el EPP adecuado:

- **Límite de Choque Eléctrico (Shock Protection Boundary - SPB):** Es la distancia desde una parte conductora energizada donde una persona debe estar adecuadamente protegida con EPP para el choque, y solo personal calificado puede cruzarla. Existen dos sub-límites:
 - **Límite Restringido (Restricted Approach Boundary - RAB):** Distancia dentro de la cual existe un riesgo de choque eléctrico incrementado. Solo personal calificado, con EPP de choque adecuado y una Permiso de Trabajo Eléctrico Energizado aprobado, puede cruzarlo.
 - **Límite de Aproximación Prohibido (Prohibited Approach Boundary - PAB):** Es la distancia más cercana a una parte energizada. Cruzar este límite es equivalente a hacer contacto con la parte energizada. Se requiere el mismo EPP y autorización que para el Límite Restringido, pero con precauciones aún más rigurosas.
- **Límite de Protección contra Arco Eléctrico (Arc Flash Protection Boundary - AFPB):** Es la distancia desde una fuente potencial de arco eléctrico dentro de la cual una persona podría recibir quemaduras de segundo grado si ocurre un arco eléctrico. Toda persona que cruce este límite debe usar EPP resistente al arco con una clasificación adecuada a la energía incidente calculada para esa distancia.

El cumplimiento estricto de estos límites es la primera línea de defensa para prevenir accidentes por choque y arco eléctrico.

Riesgos en Sistemas de Corriente Continua (CC)

Aunque los sistemas de CC de alta tensión (por ejemplo, en subestaciones de rectificadores, baterías de gran capacidad o sistemas fotovoltaicos a gran escala) son menos prevalentes que los de CA en ciertas aplicaciones industriales, presentan riesgos únicos:

- **Arco Eléctrico Sostenido:** Los arcos de CC son más difíciles de extinguir que los de CA, ya que no hay un 'paso por cero' natural en la onda de corriente. Esto puede llevar a arcos más sostenidos y de mayor energía, con mayor potencial de quemaduras severas.
- **Choque Eléctrico:** La corriente continua puede causar tetanización y quemaduras internas, similares a la CA, pero sus efectos en el sistema nervioso pueden ser diferentes.

- **Magnetismo:** Los campos magnéticos de la CC pueden afectar herramientas y equipos, y en ciertas circunstancias, pueden tener efectos fisiológicos.
- **Almacenamiento de Energía:** Baterías de gran capacidad o capacitores pueden almacenar energía considerable y liberarla rápidamente, lo que representa un riesgo de choque o arco incluso después de desenergizar la fuente principal.

Es fundamental que el análisis de riesgos considere las particularidades de los sistemas de CC, incluyendo sus propias tablas para la selección de EPP y límites de aproximación si la energía incidente no ha sido calculada.

✓ Puntos clave

- Los límites de aproximación (Restringido, Prohibido, AFPB) son distancias de seguridad vitales.
- Solo personal calificado y con EPP adecuado puede cruzar estos límites.
- Los sistemas de Corriente Continua (CC) presentan riesgos específicos, como arcos más sostenidos.
- La energía almacenada en baterías y capacitores CC es un riesgo constante.
- El análisis de riesgos debe considerar las particularidades de los sistemas de CC.

Para reflexionar

- En un sistema de CC de tu instalación, ¿dónde se aplicarían los límites de aproximación y qué consideraciones adicionales tomarías?
- ¿Cómo la ausencia de un 'paso por cero' en la corriente CC afecta la mitigación de un arco eléctrico?
- ¿Qué precauciones específicas se toman en tu empresa para trabajar de forma segura con bancos de baterías o sistemas fotovoltaicos de gran escala?

Esquema del Módulo: Principios de la Electricidad y Riesgos

Principios Eléctricos Fundamentales	Tensión, corriente, resistencia (Ley de Ohm), CA/CC, potencia y capacidad de cortocircuito como base del riesgo.
Efectos Fisiológicos de la Corriente	Impacto de la magnitud, duración y trayectoria de la corriente en el cuerpo: umbrales, tetanización, fibrilación, quemaduras.
Marco Normativo	NFPA 70E como estándar internacional y su integración con la legislación chilena (Ley 16.744, D.S. 594, D.S. 109, Pliegos RIC SEC).
Riesgos Específicos	Choque eléctrico (mecanismos y consecuencias) y arco eléctrico (explosión, calor, onda de presión, proyectiles, luz).
Análisis de Riesgos y Protección	Energía incidente, etiquetas de advertencia de arco eléctrico y selección de EPP según la categoría de riesgo.

Límites de Aproximación

Definición y aplicación de los límites de choque (Restringido, Prohibido) y arco eléctrico, incluyendo riesgos en sistemas CC.

En síntesis. Hemos llegado al final de este módulo fundamental. Has explorado los principios esenciales que rigen la electricidad, desde la Ley de Ohm hasta las diferencias entre corriente alterna y continua. Pero más importante aún, has comprendido los devastadores efectos fisiológicos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano y las peligrosas consecuencias de los eventos de choque y arco eléctrico. Hemos revisado el marco normativo que nos ampara, desde la NFPA 70E hasta la legislación chilena, y la crucial importancia de las etiquetas de advertencia de arco eléctrico y los límites de aproximación. Este conocimiento no es solo teoría; es tu primera y más importante herramienta para garantizar tu seguridad y la de tus colegas en cada jornada laboral. La electricidad es una fuerza a respetar, y con el conocimiento adecuado, puedes dominarla de manera segura.