

Desarrollo y validación de un nuevo método de evaluación de riesgos eléctricos para la prevención y mitigación de daños a personas e instalaciones

Development and validation of a new electrical risk assessment method for the prevention and mitigation of damage to people and installations

Ronaldo López Serrazina^{1, 2*}  <https://orcid.org/0000-0003-3073-8316>

Jaime Jiménez Ayala^{3, 4}  <https://orcid.org/0000-0003-3137-0242>

Joaquín Catalá Alis³  <https://orcid.org/0000-0002-2286-3638>

Recibido 19 de mayo de 2022, aceptado 05 de abril de 2023

Received: May 19, 2022 Accepted: April 05, 2023

RESUMEN

Las evaluaciones de riesgos que se han realizado hasta la actualidad y la implementación de controles no siempre son efectivas por lo poco específicas que son. Es por esto, que la finalidad de este trabajo fue desarrollar un método específico para evaluar la probabilidad y las consecuencias para los riesgos de choque y arco eléctrico, agregando una variable adicional que considera el factor personal. Para formular la ecuación, se utilizaron los métodos recomendados por la ISO 31010 de probabilidad y consecuencia, incluyendo la fiabilidad humana de la misma norma. Para definir los criterios de cada variable, se utilizó las recomendaciones de la norma NFPA 70E. Para incluir los controles, se utilizaron los principios del método Bow Tie, recomendado en la norma ISO 31010, pues la matriz que se propuso consideró los controles preventivos, mitigatorios y al factor personal por separado. El método propuesto fue evaluado, validado y demostró la utilidad, ya que, permitió evaluar de forma objetiva los riesgos eléctricos con criterios específicos, incluida la variable del factor personal y la aplicación de los controles propuestos para reducir dichos riesgos, lo que beneficiará directamente a los trabajadores expuestos y a las empresas que lo utilicen.

Palabras clave: Evaluación de riesgos, método específico, riesgos eléctricos.

ABSTRACT

The risk assessments carried out to date, and the implementation of controls are only sometimes effective due to their lack of specificity. Therefore, this work aimed to develop a specific method to evaluate the probability and consequences of shock and electric arc hazards, adding a variable that considers the personal factor. The equation was formulated using the methods recommended by ISO 31010 for probability and consequence, including the human reliability of the same standard. The recommendations of the NFPA 70E standard were used to define the criteria for each variable. For the inclusion of controls, the

¹ Universidad Católica del Norte. Escuela de prevención de Riesgos y Medio Ambiente. Coquimbo, Chile.
Email: ronaldo.lopez@ucn.cl

² Universidad Politécnica de Valencia. Escuela de Doctorado. Email: rolo4@upv.es

³ Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
Email: jajiyay@upv.es; jcatala@cst.upv.es

⁴ EDEM Escuela de Empresarios, Centro adscrito a la Universidad Politécnica de Valencia. Grado en ingeniería y Gestión Empresarial. Email: jjimenez-ayala@edem.es

* Autor de correspondencia: ronaldo.lopez@ucn.cl

principles of the Bow Tie method recommended in the ISO 31010 standard were used since the proposed matrix considered preventive, mitigating, and personal controls separately. The proposed method was evaluated and validated, which demonstrated the usefulness of the model since it allowed to assess the electrical risks with specific criteria, including the personal factor variable and the application of the proposed controls to reduce said risks, which that will directly benefit exposed workers and companies that use it.

Keywords: Risk's evaluation, specific method, electrical hazards.

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo pasado, con la incorporación de la electricidad en los procesos industriales, el riesgo de incidentes ha estado presente, es por esto, que se han estudiado los efectos de la electricidad en el cuerpo humano. Los primeros estudios se centraron en las lesiones debidas a choque eléctrico, y posteriormente incluyeron las lesiones debidas a un arco eléctrico [1].

El choque eléctrico, es el flujo de corriente eléctrica a través del cuerpo humano [2] y es causado por contacto o mayor acercamiento a un conductor eléctrico energizado o parte del circuito [3]. El arco eléctrico se definió como una descarga disruptiva generada por la ionización de un medio gaseoso, entre dos superficies o elementos a diferente potencial [4], lo que es producto de la corriente de cortocircuito y el tiempo de apertura del dispositivo de protección [5].

Cada riesgo tiene una naturaleza distinta, sin embargo, han sido evaluados como uno solo, sin mencionar, que el método de evaluación de riesgo utilizado de forma tradicional no es objetivo, ni específico, lo que ocasiona que las medidas de control no siempre sean las óptimas, ya que no se evalúan de acuerdo con las tareas específicas que se realizaban en cada empresa, sino que, se evalúan en forma general.

El método más utilizado para evaluar los riesgos industriales ha sido el método de probabilidad por consecuencia, el que, según la Organización Internacional de Normalización (ISO), en su norma 31010 [6], presenta ciertas limitaciones:

- Dificultad al definir criterios que no sean ambiguos.
- Uso muy subjetivo, ya que depende del criterio de cada evaluador.
- Dificultad para combinar o comparar el nivel de riesgo dado que estos presentan diferentes consecuencias.

El nivel de riesgo real puede verse subestimado, debido a que los resultados dependen del nivel de detalle del análisis y además la cantidad de tareas a las que esté expuesto cada trabajador.

En resumen, el problema es que no existe un método de evaluación de los riesgos eléctricos en forma específica, lo que dificulta implementar controles concretos y por ende hacer un trabajo efectivamente seguro. Por lo mismo, el objetivo de este trabajo fue proponer un método de evaluación de riesgos donde la probabilidad y la consecuencia se evalúen de forma propia y específica para los riesgos de choque y arco eléctrico. Además, agregar la variable de factores personales con la misma importancia en la evaluación de riesgos que las otras dos variables haciendo que este método sea mucho más efectivo al momento de evaluar e implementar controles para los riesgos eléctricos.

MARCO TEÓRICO

Método de evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos generalmente está basada en el estudio de la probabilidad de ocurrencia del riesgo y la severidad del riesgo dando como resultado la fórmula $R = P * C$ en donde: R = riesgo, P = probabilidad de ocurrencia de un incidente y C = consecuencias ocasionadas o severidad [7]. Pero, debido a que los accidentes eléctricos son el resultado de varios factores y condiciones específicas [8]. Este método general no es lo suficientemente eficiente para la evaluación de los riesgos de arco y choque eléctrico, ni tampoco para la incorporación de controles específicos.

Probabilidad y consecuencias de los riesgos eléctricos

La posibilidad de que se generen peligros en la industria se conoce como nivel de probabilidad. Estos niveles pueden variar según las industrias, pero en la mayoría de los casos se prefiere una calificación de

cinco escalas que van desde raro hasta casi seguro. Estas calificaciones son específicas de la industria y se basan en las medidas de seguridad existentes y la gestión de seguridad. Por otro lado, la gravedad de los peligros se conoce como consecuencia. El efecto de esas consecuencias se categorizará en diferentes niveles para conocer su impacto en la salud y seguridad de los trabajadores y van desde despreciable hasta catastrófico [9].

La Asociación Nacional de Protección contra el Fuego, en la norma 70E [10], establece que, si los conductores eléctricos no estuviesen expuestos, o si los trabajadores estuviesen fuera de sus respectivos límites de seguridad, la probabilidad de choque eléctrico es tan bajo como sea razonablemente practicable [11] y viceversa.

Si se tiene en cuenta que la impedancia del cuerpo humano fue establecida como 2.500Ω [12], los efectos del choque eléctrico pueden variar entre ligero hormigueo hasta un paro cardíaco inmediato. Existen demasiadas variables en un choque eléctrico para asumir que solo provocará un “leve cosquilleo”, mientras que otro, será una muerte segura, por lo que todos los choques eléctricos de más de 50 voltios deben considerarse potencialmente mortales [13].

Del mismo modo, la probabilidad de un incidente de arco eléctrico se relaciona directamente con la posibilidad de que se produzca un cortocircuito. Los factores que afectan esta probabilidad se pueden agrupar en dos categorías amplias, pero interrelacionadas:

- Actividades o tareas que implican interactuar con equipos eléctricos energizados
- El estado del equipo eléctrico.

Los efectos del arco y su gravedad, dependerán principalmente de la cantidad de energía involucrada en un arco eléctrico [14]. La principal preocupación con la temperatura del relámpago y la ignición de la ropa [15]. Aproximadamente a 960°C , o $10,7 \text{ cal/cm}^2$, durante una décima de segundo, la piel se vuelve incurable y aproximadamente a 780°C , o $1,2 \text{ cal/cm}^2$ durante una décima de segundo, la piel es curable, pero tiene quemaduras de segundo grado [16]. No se necesita una temperatura muy alta o demasiada energía incidente para causar lesiones graves, que pueden resultar en dolor extremo y malestar o la muerte del trabajador [15].

Factor personal

El factor humano fue definido como el estudio científico de la interacción entre el hombre y la máquina [18]. Sin embargo, en los últimos años, esta definición se ha ampliado para abarcar los efectos que los factores individuales, grupales y organizativos tienen sobre la seguridad. Esto, proporcionó a los autores, la base para definir los factores personales que influyen en el comportamiento de las personas, de manera que pueden aumentar o disminuir la productividad de un proyecto [19].

Se debe tener en cuenta que los seres humanos tienen una capacidad de procesamiento de información limitada [20]. Por ende, el error personal es la causa más frecuente de los incidentes eléctricos [10]. Es por esto, que se agregó a la ecuación de evaluación del riesgo, una variable de factor personal “Q”.

La nueva ecuación propuesta, para evaluar la magnitud del riesgo, incluye la variable probabilidad, la cual contiene la falla de equipo como un evento; la variable consecuencia, que mide la severidad, a nivel del personal, de cada evento [7]; y el factor personal, el cual incluye que el personal sea capacitado, calificado y apto para cada tarea [10].

Controles para los riesgos

Según la ISO, en la norma 45001 [16], es preciso establecer e implementar la planificación y los controles de los procesos cuando sea necesario, para aumentar la seguridad y salud en el trabajo, eliminando los peligros o, si eso no es factible, reduciendo los riesgos a niveles tan bajos como sea razonablemente viable para las áreas y actividades operacionales. Estas medidas de control se centran en: los controles de ingeniería, que sirven para aislar a las personas del peligro; implementar medidas de protección colectiva; disminuir la energía incidente del arco para prevenir la victimización [16]. Estos controles se pueden separar en dos subunidades; los controles preventivos, los cuales se encargan de disminuir la probabilidad de ocurrencia de un incidente y los controles mitigatorios, que son los encargados de reducir las consecuencias antes mencionadas.

Los controles administrativos, se encargan de regular y disminuir las fallas personales en los procesos productivos, que consisten en llevar a cabo inspecciones periódicas de los equipos de seguridad;

gestionar la coordinación de la seguridad y salud con las actividades de los subcontratistas; llevar a cabo cursos de inducción, administrar los permisos de trabajo; cambiar los modelos de trabajo de los trabajadores, entre otras labores [16].

Al utilizar el método Bow tie se deben considerar medidas de control de escalamiento como formación, certificación, procedimientos, inspección y pruebas. Estas medidas proporcionan directrices para evaluar con independencia a las medidas de control, evitando que fallen [21].

METODOLOGÍA

Basados en el método de probabilidad por consecuencia, se definieron los criterios específicos de evaluación para ambas variables de riesgo de choque eléctrico, (Tabla 5 y Tabla 6) y criterios específicos para la probabilidad y consecuencia del riesgo de arco eléctrico, (Tabla 7 y Tabla 8). Posteriormente, se le incluyó la variable del factor personal siguiendo las recomendaciones del método de fiabilidad humana presentado en la ISO 31010, (Tabla 9).

En base al problema planteado, se propuso evaluar la magnitud de los riesgos de choque y arco eléctrico siguiendo las recomendaciones de las normas NFPA 70E [10] e ISO 31010 [6]. Para esto, al método de probabilidad por consecuencia ya adaptado, se le incorporó la variable del factor personal. El método propuesto se representa mediante la ecuación (1).

$$MR = P * C * Q \quad (1)$$

Dónde:

MR: Magnitud del riesgo.

P: Probabilidad.

C: Consecuencia o Severidad.

Q: Factor Personal.

Finalmente, para seleccionar las medidas de control específicas, se utilizó una matriz basada en los principios del método Bow Tie (Tabla 10), donde se incluyeron controles separados para cada riesgo. Estos controles se dividieron en la matriz de la siguiente forma: controles preventivos, que disminuyen directamente la variable de probabilidad; los controles mitigatorios, disminuyen directamente las consecuencias y los controles administrativos, que disminuyen directamente la variable del factor personal. De la reducción de estas variables con

controles específicos, eficientes y eficaces, dependerá la magnitud del riesgo final al que se expongan los trabajadores.

Para asegurar la eficacia de los controles propuestos, se definieron factores y controles de escalamiento aplicados a cada uno de los controles propuestos.

Validación del método de evaluación de riesgos eléctricos

La validación del método de evaluación de riesgos propuesto se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo, para lo cual, especialistas de mantenimiento eléctrico y especialistas en prevención de riesgos, realizaron evaluaciones de riesgos eléctricos en distintas tareas eléctricas y no eléctricas. Se presentó al usuario la matriz de riesgos en forma de archivo Excel automatizada y con esta aplicación se realizaron las evaluaciones solicitadas. Después, los especialistas que desarrollaron las evaluaciones completaron una encuesta de respuestas cerradas, que permitió evaluar el uso del método propuesto.

Se creó una encuesta llamada: Encuesta de validación del método de evaluación de riesgos eléctricos, como recomienda [22], con el estilo de cuestionario tipo “pregunta cerrada”, mostrado en [23], para determinar si la herramienta de evaluación de riesgos propuesta, cumple con los parámetros de utilidad necesarios para gestionar los riesgos a partir de sus factores, si es de fácil entendimiento y utilización y, si responde a los requerimientos de los usuarios, entre otros parámetros de evaluación.

La encuesta se construyó con 39 preguntas, las cuales se agruparon en 4 grandes tópicos: efectividad de la matriz de evaluación de riesgo eléctrico (Tabla 1), la utilidad de las matrices de evaluación de riesgo (Tabla 2), la claridad y fácil entendimiento que poseen estas matrices de evaluación (Tabla 3) y cómo influye el factor personal en la evaluación de riesgos (Tabla 4). Además, se empleó un análisis de datos a través de tabla Excel y gráficos, en donde cada pregunta se analizó mediante estadística descriptiva. Estos datos fueron procesados por separado y posteriormente fueron estudiados y evaluados según el tipo de respuesta obtenida, acorde a las propuestas en el cuestionario, estas fueron: de acuerdo o en desacuerdo.

Tabla 1. Preguntas referentes a la efectividad de la matriz de evaluación de riesgos eléctricos propuesta.

Nº de Pregunta	Tópico de efectividad de la matriz de riesgo
P 1	– ¿La probabilidad y la consecuencia para el análisis de arco eléctrico es la adecuada?
P 2	– ¿La probabilidad y la consecuencia para el análisis de choque eléctrico es la adecuada?
P 3	– ¿la matriz de riesgos elaborada cuenta con una estructura lógica para su desarrollo?
P 4	– ¿Los controles que aparecen en la cartilla son fácil de gestionar y eliminan o minimizan los Riesgos eléctricos?
P 5	– ¿La separación del riesgo eléctrico en Choque Eléctrico y Arco Eléctrico es necesaria ya que corresponde a fenómenos de diferente naturaleza y distintos controles?
P 6	– ¿La matriz presentada muestra una nueva metodología para la evaluación de riesgos, tanto de actividades de personal electricista como también de usuarios de la electricidad?
P 7	– Junto para prevenir y mitigar el riesgo del arco y choque eléctrico ¿considera Ud. apropiado el análisis del control del factor humano, cuando se realizan las actividades del mantenimiento como son; motores, transformadores, switchgear, ¿aire acondicionado y presurizadores de aire?
P 8	– Según su experiencia, ¿resulta comprensible la matriz de riesgo enviada para evaluar los riesgos asociados a una actividad eléctrica?
P 9	– ¿se entiende claramente cómo se determina la probabilidad de un choque y arco eléctrico y a que se refiere en la matriz de riesgo eléctrico?
P 10	– ¿Cómo le resulta la aplicación de riesgo puro y residual en la matriz de riesgo eléctrico?

Tabla 2. Preguntas referentes a la utilidad de las nuevas matrices de evaluación de riesgo eléctrico.

Nº de pregunta	Tópico de utilidad de las nuevas matrices de riesgo
P 1	– ¿Considera que esta cartilla, es útil, para completar en terreno como documentos o preferiría un sistema digital para realizar este chequeo?
P 2	– El uso de la matriz, ¿ayuda a entender la diferencia entre medidas de control preventivas, mitigatorias y administrativas?
P 3	– ¿Cree usted que la matriz propuesta puede implementarse en cualquier área, proceso o actividad independiente el rubro?
P 4	– ¿Usted aplicaría esta misma matriz para la identificación de peligros y evaluación de riesgo?
P 5	– ¿Usted implementaría esta herramienta para su proceso de trabajo actual?
P 6	– De las medidas de control identificadas, ¿cree usted que benefician en relación con la evaluación de riesgo?
P 7	– ¿Cómo considera la implementación de esta nueva tabla de probabilidad (nivel de eficiencia), respecto a la clase según al número de incidentes?
P 8	– ¿Qué le parece a usted la incorporación de la verificación de las medidas de control a esta nueva matriz de riesgos eléctrica?
P 9	– ¿Cómo evalúa que este tipo de matriz de riesgo se aplique a la organización?
P 10	– ¿La Cartilla de Controles Críticos para trabajos Eléctricos presentada es útil, para eliminar o minimizar los riesgos eléctricos?

La encuesta de validación del método fue desarrollada en software Microsoft Forms, el cual recopila las respuestas de los usuarios. Esta encuesta de evaluación funciona desde cualquier navegador web y en cualquier dispositivo computador o teléfono celular.

Población y muestra

En la encuesta de validación del método de evaluación de riesgos eléctricos se empleó un tipo de muestreo intencional de población, la cual se enfocó principalmente a personal relacionado con la seguridad y salud ocupacional, mantenedores y supervisores eléctricos.

Tabla 3. Preguntas referentes a la claridad y facilidad de entender de las nuevas matrices de evaluación de riesgo eléctrico.

Nº de Pregunta	Tópico de claridad de las nuevas matrices de riesgo
P 1	– ¿Los controles considerados como preventivos se identifican en forma clara?
P 2	– ¿Es fácil de entender y de utilizar la matriz propuesta?
P 3	– La matriz presentada ¿permite establecer actividades de seguimiento de los controles y así poder evaluar su efectividad, pudiendo utilizarse de base para el establecimiento de un sistema de gestión de seguridad eléctrica?
P 4	– ¿Las medidas de control estipuladas en la evaluación del riesgo son claras y precisas?
P 5	– ¿Se entiende en la matriz todos los conceptos y terminologías señaladas en cada una de sus tablas?
P 6	– ¿Se entiende claramente cómo se determinan los niveles de consecuencias en la matriz de riesgos eléctricos?
P 7	– ¿Se entienden claramente los conceptos de riesgo residual y puro en la matriz de riesgos eléctricos?
P 8	– ¿Se entiende claramente cómo se determina el valor esperado de pérdida, en la matriz de riesgos eléctricos?
P 9	– ¿Son claros y entendibles los niveles establecidos para evaluar el riesgo (Probabilidad, factor humano y consecuencias)?
P 10	– ¿Se entiende claramente lo que se define factor humano y a que se refiere la matriz de riesgos eléctricos?

Tabla 4. Preguntas referentes a cómo influye el factor humano en la evaluación de riesgo.

Nº de Pregunta	Tópico del factor Personal
P 1	– ¿Los controles del factor humano se logran identificar fácilmente?
P 2	– ¿El factor humano, permite ampliar la visión en base a la evaluación de los riesgos?
P 3	– ¿considera que el factor humano aporta en la medición del riesgo?
P 4	– ¿consideraría incorporar el control del factor humano en la matriz de riesgo?
P 5	– ¿Cree usted que al evaluar el riesgo eléctrico y se considera el error humano se logre una evaluación más precisa de este?
P 6	– En una matriz de riesgo para el área eléctrica, ¿consideraría evaluar junto a los controles mitigatorios y preventivos, el factor humano para la medición de la magnitud del riesgo?
P 7	– Si una matriz de riesgo para el área eléctrica incluye el factor humano como parte de los controles para realizar una actividad de mantenimiento u operación ¿ayuda esto a medir mejor la magnitud del riesgo?
P 8	– De acuerdo con sus respuestas. ¿Consideraría adoptar la empresa en que trabaja una matriz de riesgo que incluya el factor humano como un control en el análisis de la magnitud de riesgo?
P 9	– ¿está de acuerdo que se agregue en la valoración de la magnitud del riesgo, la variable del factor humano?

El proceso de recolección de información se llevó a cabo aplicando la encuesta y entregando la matriz de riesgo para su validación a una población de 49 individuos compuestos por: 21 especialistas SSO y 28 especialistas eléctricos. A cada uno de los especialistas, se le presentó la matriz, se le explicó el contenido y la forma de utilizar la herramienta de evaluación.

RESULTADOS

Para el desarrollo de la ecuación en la que se basa el nuevo método de evaluación de riesgos eléctricos, con la inclusión del factor personal se establece una influencia directa sobre el nivel de riesgo, pues una persona que aplica medidas o controles de seguridad efectivos y preventivos

podrá disminuir el riesgo de un accidente o incidente, obteniendo así lo enseñado en la ecuación (1), interpretando a Q como se muestra en la ecuación (2).

$$Q = \frac{1}{\text{Medidas de seguridad}} \quad (2)$$

Así, el factor personal Q ecuación (2), y, por consiguiente, MR en la ecuación (1), obtiene valores más elevados mientras menos efectivas sean las medidas de seguridad que aplique el personal, y, dicha efectividad es a su vez directamente proporcional con lo capacitado que se encuentre el personal, lo que significa que mientras mejor capacitado este el personal implicará una mejor efectividad en las medidas de seguridad que este utilicen, dado un mayor conocimiento sobre las medidas de seguridad y sobre la realización del trabajo en sí. Esto matemáticamente se traduce en la ecuación (3) y por consiguiente al ser directamente proporcionales se obtiene la ecuación (4):

$$\text{Medidas de seguridad} \propto \text{Capacitación del Personal} \quad (3)$$

$$\text{Implica } Q = \frac{1}{\text{Capacitación del Personal}} \quad (4)$$

Por otro lado, por medio de la interpretación de las variables de Probabilidad y Consecuencia, al aplicar medidas de seguridad efectivas se reduce la probabilidad de que ocurra un evento o disminuir la magnitud de los daños. Es importante destacar que no necesariamente las medidas de seguridad que influyan en la probabilidad de ocurrencia de un evento tendrán también algún efecto en la consecuencia o viceversa. Por ejemplo, utilizar el EPP adecuado para determinado trabajo disminuyendo la magnitud de los daños (valor de la consecuencia) no necesariamente disminuirá la probabilidad de que se genere un evento.

La condición para la probabilidad de ocurrencia de un choque eléctrico está determinada por la exposición de los puntos energizados, si el trabajador se encuentra o no en los límites de seguridad, las condiciones del equipo y finalmente si el diseño es apropiado o no como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios y valores creados para determinar probabilidad de ocurrencia para choque eléctrico en base a la norma NFPA 70E [6] y ISO 31010 [10].

Criterios de probabilidad	Valor
– Circuito con puntos energizados expuestos. – Límite de seguridad dentro de la frontera limitada. – Condición del equipo: Existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: No cumple con los criterios de diseño.	4
– Circuito con puntos energizados expuestos. – Límite de seguridad dentro de la frontera limitada. – Condición del equipo: Existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: Cumple con los criterios de diseño.	3
– Circuito con puntos energizados no expuestos. – Límite de seguridad dentro de la frontera limitada. – Condición del equipo: existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: Cumple con los criterios de diseño.	2
– Circuito con puntos energizados no expuestos. – Límite de seguridad dentro de la frontera limitada. – Condición del equipo: sometido a un plan de mantenimiento sistemático y no presenta evidencia de fallas o defectos. – Diseño: Cumple con los criterios de diseño.	1

La severidad de las consecuencias depende directamente de la tensión a la que se puede entrar en contacto y la impedancia que pueda presentar el cuerpo humano. Esto hace que los criterios de evaluación de las consecuencias dependan de la tensión del equipo o sistema donde se realizará el trabajo, como se muestra en la Tabla 6.

Los factores para determinar los criterios de la probabilidad de un arco eléctrico fueron definidos

por la condición en se encuentra en equipo y la interacción que se pueda tener con dicho equipo como lo muestra la Tabla 7.

Para los criterios de las consecuencias del arco eléctrico se usa como parámetro la energía incidente del relámpago de arco, el cual, proporciona una medida del impacto térmico directo sobre la superficie expuesta de la piel. La unidad de la energía incidente es cal/cm^2 [14] como muestra la Tabla 8.

Tabla 6. Criterios y valores creados para determinar las consecuencias choque eléctrico en base a lo escrito en (13).

Criterios	Choque Eléctrico	Valor
Criterios de Consecuencia de Choque Eléctrico	ALTA: 110 - 220 Volt y mayor	4
	MEDIA: 80 - 110 Volt	3
	BAJA: 50 - 80 Volt	2
	INSIGNIFICANTE: 12 - 50 Volt	1

Tabla 7. Criterios y valores creados para determinar probabilidad de ocurrencia para arco eléctrico en base a lo estipulado en la norma NFPA 70E [6].

Criterios probabilidad	Valor
– Interacción con el equipo eléctrico energizado: Actividad conlleva a realizar movimiento del equipo. – Condición del equipo: existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: No cumple con criterios de diseño.	4
– Interacción con el equipo eléctrico energizado: Actividad conlleva a realizar movimiento del equipo. – Condición del equipo: existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: Cumple con criterios de diseño.	3
– Interacción con el equipo eléctrico energizado: Actividad no conlleva a realizar movimiento del equipo. – Condición del equipo: existen evidencias visibles de que el equipo o sistema no está adecuadamente mantenido o evidencias de fallas y/o defectos. – Diseño: Cumple con criterios de diseño.	2
– Interacción con el equipo eléctrico energizado: Actividad no conlleva a realizar movimiento del equipo. – Condición del equipo: Sometido a un plan de mantenimiento sistemático y no presenta evidencia de fallas o defectos. – Diseño: Cumple con criterios de diseño.	1

Tabla 8. Criterios y valores creados para determinar las consecuencias arco eléctrico en base a lo estipulado en Nietzel [15] y Pigl [14].

Criterios	Arco Eléctrico	Valor
Criterios de Consecuencia de Arco Eléctrico	ALTA: 8 - 40 cal/cm^2 y mayor	4
	MEDIA: 4 - 8 cal/cm^2	3
	BAJA: 1,2 - 4 cal/cm^2	2
	INSIGNIFICANTE: 0 - 1,2 cal/cm^2	1

Al igual que con las otras variables, también se establecieron criterios para la aplicación del factor personal en la evaluación de riesgos eléctricos (Tabla 9), poniendo énfasis en evaluaciones físicas, psicológicas, capacitaciones, entrenamientos y prácticas de trabajo.

Al implementar el método de evaluación de riesgos en una matriz, se procede a incluir las medidas de control, con la finalidad de disminuir el riesgo. Estos controles se separaron en: preventivos, mitigatorios y administrativos para que el evaluador que trabaja

con esta matriz (Tabla 10), sepa que variable está influyendo en los controles que va proponiendo en forma específica.

Para la validación del método, se procesaron los datos obtenidos a partir de las encuestas, y a continuación, se presentan figuras que representan gráficamente la tendencia a la aprobación de cada uno de los tópicos tratados, en donde el porcentaje promedio de aprobación acerca de la efectividad de la matriz de riesgos eléctricos (Figura 1) es del 86,9%, con respecto a la utilidad (Figura 2) es de

Tabla 9. Criterios y valores creados para determinar el factor personal para choque y arco eléctrico según la Norma ISO 31010 [6] y NFPA 70E [10].

Variable		Criterio	Valor
Factor Humano (Q)	Alta	- El personal no ha pasado por un proceso de evaluación formal ni calificación. - Tampoco cuenta con experiencia en la tarea a realizar.	4
	Media	- El personal solo se ha evaluado física y psicológicamente. - Cuenta con las inducciones y capacitaciones para la tarea a realizar. - Cuenta con experiencia en la tarea a realizar.	3
	Baja	- El personal se ha evaluado física y psicológicamente. - Cuenta con capacitación y entrenamiento de la tarea a realizar. - No existe evaluación del aprendizaje.	2
	Insignificante	- El personal se encuentra apto física y psicológicamente. - Se ha capacitado, entrenado, evaluado cada 12 meses y con experiencia con respecto a la tarea a realizar.	1

Tabla 10. Tabla de controles preventivos, mitigatorios y administrativos.

Riesgos Eléctricos	Riesgo	Controles Preventivos (Probabilidad)	Controles Mitigatorios (Consecuencias)	Controles Administrativos (F. Personal)
	Choque Eléctrico	- Equipos e instalaciones según diseño. - Mantenimiento. - Aplicar pruebas según indicaciones de fabricante. - Verificar efectividad del sistema. - Inspecciones periódicas. - Equipos aislantes y/o aislados.	- Protección diferencial. - Rescate y primeros auxilios. - Sistemas de puesta a tierra de protección.	- Condición física y psicológica. - Calificación y entrenamiento. - Procedimiento para trabajos desenergizados. - Requerimientos para trabajos energizados. - Señalización.
	Arco Eléctrico	- Equipos e instalaciones según diseño. - Mantenimiento. - Aplicar pruebas según indicaciones de fabricante. - Verificar efectividad del sistema. - Inspecciones periódicas.	- Energía incidente menor a 40 cal/cm². - Coordinación de protecciones. - Relé a prueba de arco. - Tablero a pruebas de arco. - Operación a distancias. - EPP ignífugo seleccionado en base a la energía incidente.	- Condición física y psicológica. - Calificación y entrenamiento. - Procedimiento para trabajos desenergizados. - Requerimientos para trabajos energizados. - Señalización.

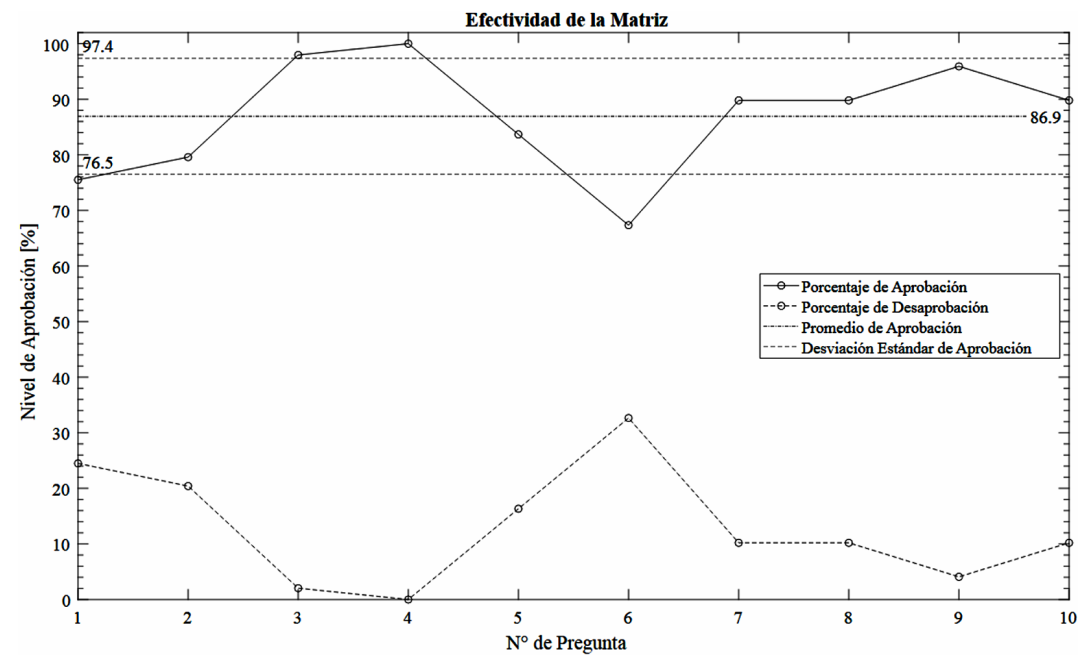


Figura 1. Aprobación de la efectividad de la matriz de riesgos eléctricos propuesta.

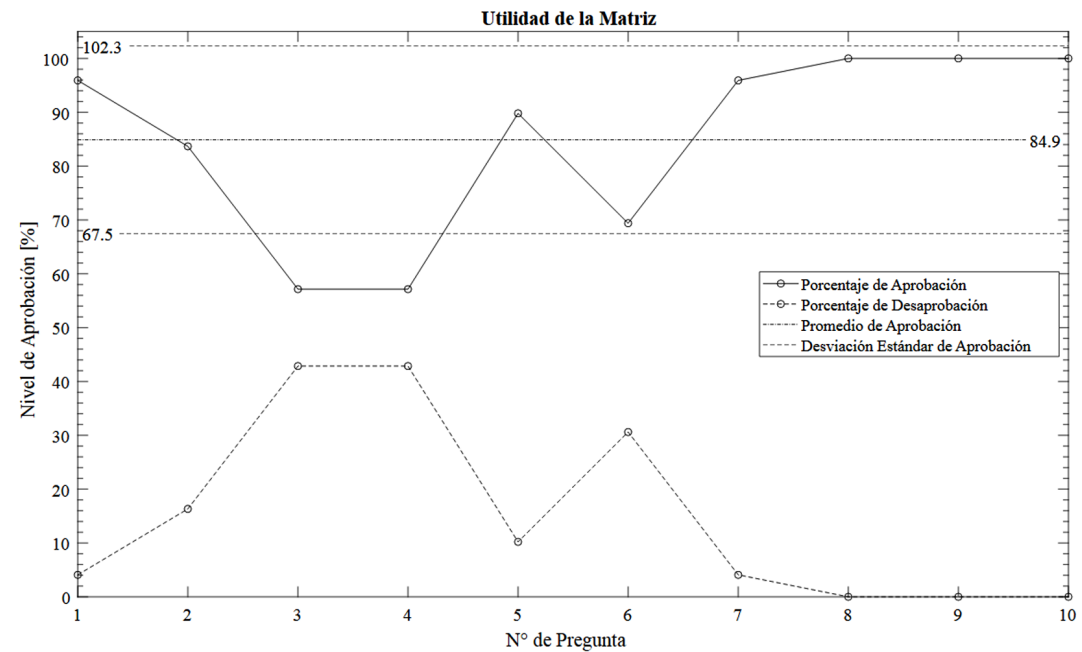


Figura 2. Utilidad en la implementación de la matriz de riesgo propuesta.

un 84,9%, la claridad de la matriz (Figura 3) fue validada con un 84,9% y finalmente la aprobación por la incorporación del factor personal (Figura 4) es de un 86,8%.

DISCUSIÓN

Basado en los resultados obtenidos, se tiene que la ecuación propuesta para evaluar la magnitud del

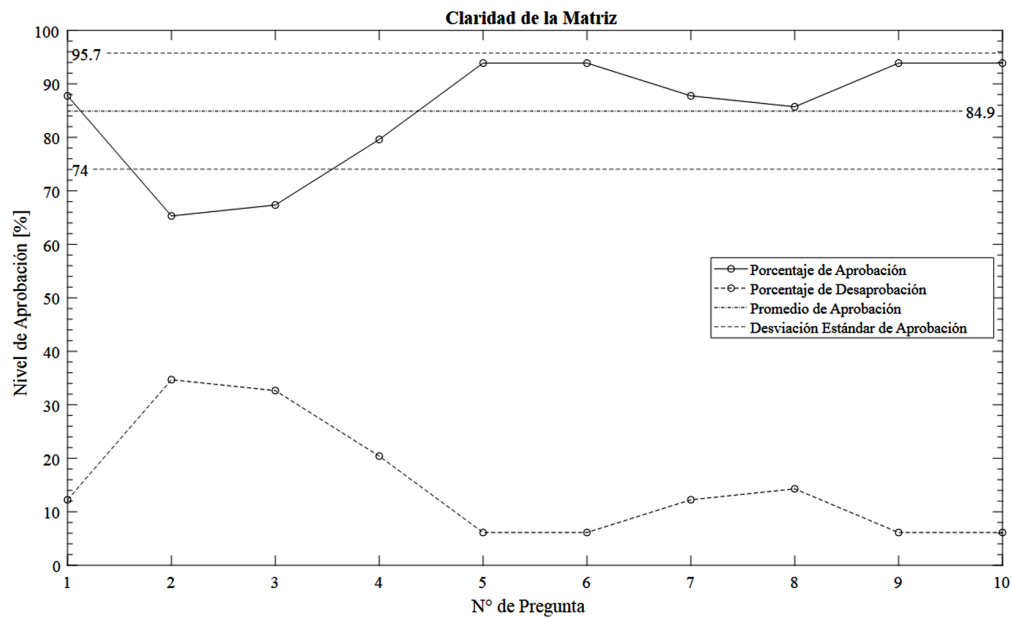


Figura 3. Claridad de la matriz de riesgo propuesta.

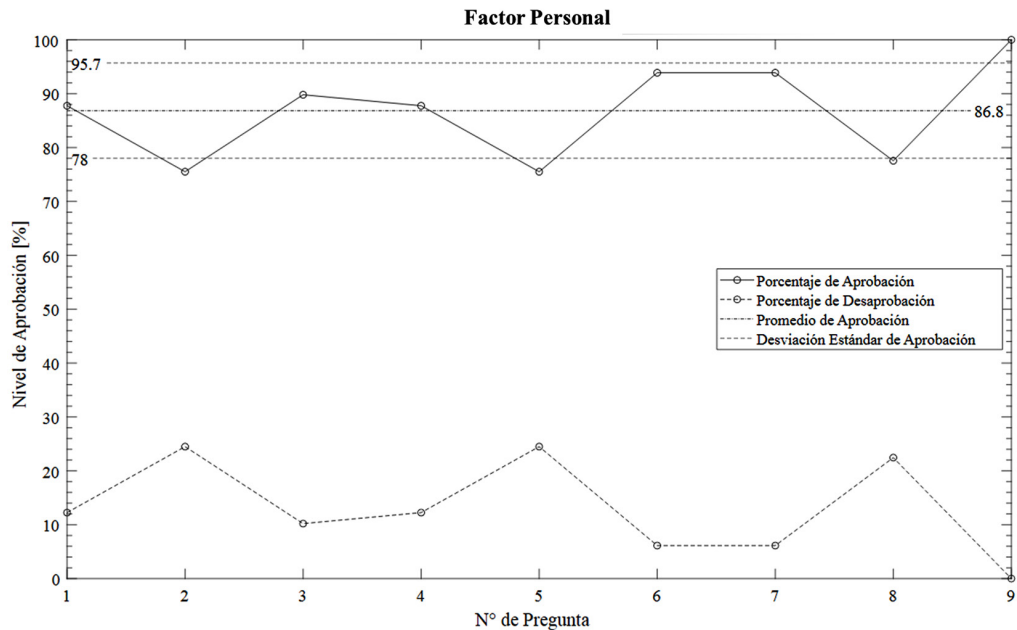


Figura 4. Implementación del factor personal.

riesgo incluye las variables de probabilidad, la cual contiene el estado del equipo como una condición que aumenta la probabilidad de que se produzca el choque o el arco eléctrico, según sea el caso; la variable consecuencia, que mide la severidad

a nivel del daño al personal en cada evento; y la variable que considera el factor personal, la cual implica que el personal sea capacitado, calificado y apto para cada tarea. Cada una de estas variables va acompañada con sus respectivos controles para

cada fenómeno, con la finalidad de disminuir el valor del riesgo y hacer más efectivo el modelo.

Criterios de probabilidad y consecuencias de choque y arco eléctrico

Para evaluar la probabilidad de que ocurra un choque eléctrico, se toma en consideración los límites de seguridad, el estado del equipo y el diseño de este mismo (Tabla 5). Estos criterios al ser analizados, se les da un valor para el riesgo de que pueda ocurrir un incidente de choque eléctrico.

Para los criterios de las consecuencias del choque eléctrico se considera la tensión del sistema ya que se evaluó la impedancia más baja del cuerpo humano [16]. Considerando ambas variables, por Ley de Ohm podemos obtener la corriente que puede pasar por el cuerpo humano y conocer los daños que puede producir dicha corriente (Tabla 6).

Para la probabilidad del arco eléctrico, se toma en consideración la interacción con el equipo eléctrico energizado, el estado del equipo y el diseño, que al ser analizados se le otorga un valor cuantitativo a la probabilidad que ocurra este incidente (Tabla 7).

El daño ocasionado por el arco eléctrico, depende de la energía incidente que afecta la piel (Tabla 8), la que causa un alza de temperatura de forma abrupta [4]. Pero una energía incidente por encima de 40 cal/cm² no es lo suficientemente predecible, salvo que existe el riesgo de quemaduras significativas, por sobre el tercer grado [13]. Por esto, cualquier evento con energía incidente superior a este valor se considera un riesgo no tolerable.

Análisis de la variable que considera el factor personal

El principal factor de riesgo, dentro de la variable del factor personal, son los problemas con los procedimientos, la falta de calificación y entrenamiento [17], la mala implementación de éstas, puede significar una conducta peligrosa de dichos trabajadores. Por lo mismo, se considerarán estos problemas al momento de evaluar los factores personales (Tabla 9).

Identificación e implementación controles

Los controles para la prevención de los riesgos están centrados en evitar que las personas entren en contacto con la electricidad [13], para el caso del choque eléctrico. Por su parte para disminuir

la probabilidad de que ocurra un arco eléctrico, el foco estará puesto en los controles que eviten que se produzca un cortocircuito [10].

Es necesario tener claro, cuáles son los controles mitigatorios para arco y choque eléctrico. Para que en caso de que ocurran, saber cuáles son las medidas de control para reducir al mínimo las consecuencias [16].

En la matriz de riesgos resultante (Tabla 10), se incluyen por separado los controles preventivos, encargados de disminuir la probabilidad, con respecto a los controles mitigatorios que se encargan de disminuir las consecuencias, y estos, independientes de los controles administrativos que se enfocan en reducir el riesgo que puede producir la variable del factor personal. Además, se identifican los factores de escalamiento y se proponen medidas de mitigación para estos factores, para asegurar la efectividad de los controles principales [24].

Análisis de la validación del método de evaluación de riesgos eléctricos

Según el análisis de los resultados, se pudo determinar que la efectividad (Figura 1), la utilidad (Figura 2) y la claridad (Figura 3), tienen una alta aprobación. Los especialistas encontraron que el método de evaluación de riesgos eléctricos es sencillo y fácil de aplicar, lo cual es una gran ventaja, ya que esto puede marcar una gran diferencia en el momento de interpretar los riesgos y por consiguiente en la objetividad de esta evaluación [25].

Como se puede apreciar en la (Figura 5), las medianas de aprobación de las preguntas de todos los tópicos tienen una aprobación por encima del promedio de aprobación de los tópicos evaluados, los especialistas dieron una gran aprobación de un promedio de 87%, a la incorporación de la variable de factores personales a la matriz (Figura 4). Destacando que la aprobación de la incorporación del factor humano (pregunta 9 del tópico de factores personales), llega a un 100%.

Igualmente, en la (Figura 5) se logra destacar la poca dispersión de los datos que existe en 3 tópicos como lo son, el factor personal, la claridad de la nueva matriz de riesgos y la efectividad de la misma al momento de ser aplicada para la evaluación de los riesgos eléctricos, esto contrasta con el tópico

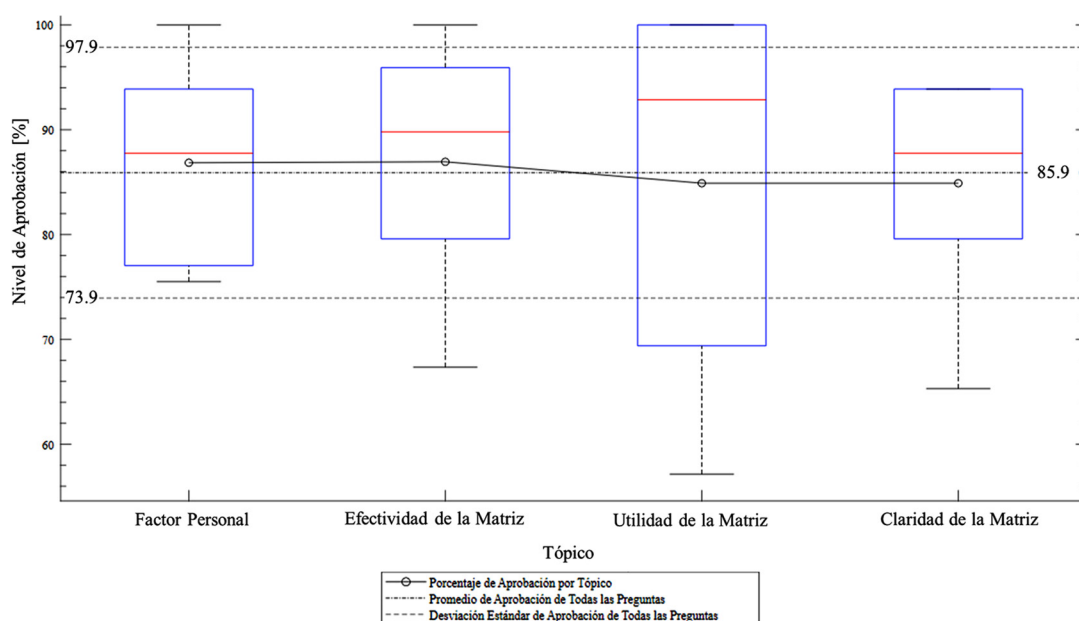


Figura 5. Análisis de la aprobación por tópico del método de evaluación de riesgos eléctricos.

de utilidad de la matriz, algo que de acuerdo a los entrevistados la dificultad para usar esta herramienta por cada especialista será subjetiva, ya que dependerá de varios factores más personales como la capacitación previa con respecto a los riesgos eléctricos, el uso y manejo de matrices de riesgo y por último la empresa y las condiciones que brinde para su uso y aplicación, en este caso es importante aclarar que no es lo mismo evaluar los riesgos eléctricos en lugares como puertos y empresas que cuenten con sistemas eléctricos con ambientes húmedos, a realizar evaluaciones de riesgos en empresas mineras en medio del desierto donde las condiciones ambientales influyen directamente en la evaluación de los riesgos.

LIMITACIONES, RECOMENDACIONES Y PROYECCIONES

Limitación del método

Aunque se debe tener en cuenta que ningún control es infalible, todos los controles están sujetos a errores de desempeño, ya sea en la fase de diseño, de implementación, o de uso [10] y, como en todas las evaluaciones de riesgo, los controles primarios por sí solos no aseguran en la práctica la disminución de los riesgos, necesitan además de controles secundarios, lo que, en la actualidad, no

ocurren con la mayoría de los métodos. Además, se debe tener en cuenta que para incluir todos los controles necesarios que requiere una efectiva evaluación de riesgos, es necesario considerar aplicaciones informáticas específicas. No basta con una planilla Excel.

Recomendaciones

Se recomienda utilizar este método de evaluación de riesgos en conjunto con la matriz de evaluación propuesta, ya que facilita la evaluación de riesgos eléctricos, donde evaluadores, revisores y usuarios utilizan los mismos criterios; separa los riesgos de arco y choque eléctrico, en evaluaciones específicas para cada uno; con separación de controles, ya sean preventivos, mitigatorios y administrativos lo que en la práctica facilita la disminución del riesgo y permite medir la eficacia al implementar controles secundarios.

Proyecciones

La metodología y matriz de riesgos propuestas, puede ser utilizada para la evaluación de riesgos distintos a los eléctricos. Esto ya se ha realizado pero los resultados no son parte de este estudio. Sobre todo, la incorporación del factor personal como una variable independiente de la evaluación de riesgos.

CONCLUSIONES

Finalmente, el análisis expuesto nos indica que la creación de un método de evaluación de riesgos, específico para los riesgos eléctricos, que cumpla con las características necesarias para poder ser aplicado de forma efectiva no es fácil, debido al poco desarrollo del tema, pero gracias a los criterios creados en base a las normas NFPA 70E (2021) y, utilizando los métodos señalados por la ISO 31010 (2013), fue posible realizarlo.

La matriz resultante, fue altamente aceptada por su objetividad y eficacia, gracias a su enfoque sistemático, en donde, se proponen una serie de medidas para mejorar la seguridad siguiendo estrategias agrupadas. Esas estrategias son efectivas y permiten considerar todos los riesgos y niveles de protección de un proceso, donde los controles preventivos y mitigatorios se pueden caracterizar como controles de ingeniería y, los controles que afecten al factor personal se consideren como controles administrativos.

Para tener un efectivo control de los riesgos con este método y en cualquier otro método de evaluación de riesgos, se deben identificar los factores de escalamiento, que son las causas que pueden hacer que se anulen o fallen los controles. Al identificar los factores de escalamiento, se podrán identificar e implementar controles para dichos factores. Esto es complejo cuando no se tiene la experticia, de ahí la importancia de tener herramientas sencillas de utilizar, con criterios específicos y definidos, como lo propuesto. Por ejemplo, en medidas mitigatorias como una protección diferencial o un sistema de puesta a tierra, se requerirá de mantenimiento, pruebas, inspecciones para que este dispositivo no falle. De la misma forma en el factor personal, la supervisión efectiva, observaciones conductuales, liderazgo visible, evaluación constante de los procedimientos, controles ocupacionales y otros que asegurarán que el trabajador se encuentra física, técnica y psicológicamente apto para hacer el trabajo, reduciendo las probabilidades y/o consecuencias de que ocurra un accidente, haciendo el trabajo eléctrico más seguro.

REFERENCIAS

- [1] B. Gordon, L. Cartelli, and N. Graham, "A Complete Electrical Shock Hazard Classification System and Its Application," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6554-6565, Nov.-Dec. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2803768.
- [2] Z. Ning, F. Guang, Z. Zimo, Y. Kun, Y. Mingqi, and Z. Xiangjun, "Personal Electric Shock Situation Analysis Method for Distribution Network," in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Tianjin, China, Sep.-Dec. 2018, pp. 1654-1658, doi: 10.1109/CICED.2018.8592377.
- [3] D. Roberts, "Risk Management of Electrical Hazards: Bridging the Gap in Understanding Hazard Versus Risk," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 21-26, May-June 2013, doi: 10.1109/MIAS.2012.2215655.
- [4] R. Lee, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-18, no. 3, pp. 246-251, May 1982, doi: 10.1109/TIA.1982.4504068.
- [5] D. Neitzel, "Electrical hazard assessments - Do I still need to do them?," in *2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Detroit, MI, USA, May-June 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS.2016.7490244.
- [6] *Gestión del riesgo, Técnicas de evaluación de riesgo*, NCh-ISO 31010, Organización Internacional de Normalización (ISO), pp. 67-80, 2013.
- [7] B. Suhardi, A. Estianto, and P. Laksono, "Analysis of potential work accidents using hazard identification, risk assessment and risk control (HIRARC) method," in *2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, Yogyakarta, Indonesia, Oct. 2016, pp. 196-200, doi: 10.1109/ICIMECE.2016.7910457.
- [8] M. Mitolo, "Safety and Risk Analysis of Standard Protective Measures Against Electric Shock," in *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, USA, Sep. 2007, pp. 2122-2127, doi: 10.1109/07IAS.2007.321.

- [9] S. Ajith, V. Arumugaprabu, V. Ajith, K. Naresh, and P. Sreekanth, "Hazard identification and risk assessment in firework industry," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, part 3, pp. 1083-1085, 2022, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.102.
- [10] *Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces*, 70E, National Fire Protection Association (NFPA), pp. 15-30. 2021.
- [11] M. Villarrubia, "Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano", *Montajes e Instalaciones: Revista Técnica Sobre La Construcción e Ingeniería de Las Instalaciones*, pp. 51-59. Jul.-Aug. 2000.
- [12] D. Crow, D. Liggett, and M. Scott, "Changing the electrical safety culture," in *2017 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*, Reno, NV, USA, Jan. 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESW.2017.7914838.
- [13] J. Pígl, "Arc Flash Risk Assessment Using Methodology FMECA," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, Italy, Jun. 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493936.
- [14] D. Neitzel, "Controlling electrical hazards through effective risk management," in *2011 Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*, Toronto, ON, Canada, Sep. 2011, pp. 1-8, doi: 10.1109/PCICon.2011.6085873.
- [15] E. Marrugo, "Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo", *Información Tecnológica*, vol. 30, no. 4, pp. 1, Aug. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000400001.
- [16] S. Tan and K. Moinuddin, "Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analysis in high-rise buildings," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 188, pp. 233-250, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ress.2019.03.012.
- [17] V. Thevendran and M. Mawdesley, "Perception of human risk factors in construction projects: an exploratory study," *International Journal of Project Management*, vol. 22, no. 2, pp. 131-137, Feb. 2004, doi: 10.1016/s0263-7863(03)00063-2.
- [18] S. Pender, "Managing incomplete knowledge: Why risk management is not sufficient," *International Journal of Project Management*, vol. 19, no. 2, pp. 79-87, Feb. 2001, doi: 10.1016/s0263-7863(99)00052-6.
- [19] J. Cockshott, "Probability bow-ties a transparent risk management tool," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 83 no. 4, pp. 307-316, Jul. 2005, doi: 10.1205/psep.04380.
- [20] *Efectos de la corriente sobre el hombre y los animales domésticos*, UNE-IEC/TS 60479-1:2007, Normalización española (UNE), 2007.
- [21] P. Gholizadeh, I. Onuchukwu, and B. Esmaeili, "Trends in Catastrophic Occupational Incidents among Electrical Contractors, 2007-2013," *Int. J. Environmental Res. Public Health*, vol. 18, no. 10, pp. 5126, may. 2021, doi: 10.3390/ijerph18105126.
- [22] J. Casas, J. Labrador y J. Campos, "La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos (I)", *Atención Primaria*, vol. 31, no. 8, pp. 527-538, May. 2003, doi: 10.1016/s0212-6567(03)70728-8.
- [23] F. Alvira, *La encuesta: una perspectiva general metodológica (Cuadernos Metodológicos)*, 2nd ed. Madrid, España: Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS), 2011, pp. 32-45.
- [24] M. Doherty, "NFPA 70E-15 Shock and Arc Flash Risk Assessment best practices," in *2017 Annual Pulp, Paper And Forest Industries Technical Conference (PPFIC)*, Tacoma, WA, USA, Jun. 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPIC.2017.8003874.
- [25] A. Haluik, "Risk perception and decision making in hazard analysis: improving safety for the next generation of electrical workers," in *2016 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*, Jacksonville, FL, USA, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ESW.2016.7499712.