

Riesgo de incendio forestal de una subestación eléctrica.**Wildfire risk posed by an electrical substation.**DOI: <https://doi.org/10.82951/0753-8831>Gonzalo Severino¹, Andrés Fuentes², Pedro Reszka³¹*Departamento de Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile,*
gonzalo.severino@usm.cl (G.S.)²*Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile,*
andres.fuentes@usm.cl (A.F.)³*Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile,* pedro.reszka@uai.cl
(P.R.)**Autor de correspondencia:** gonzalo.severino@usm.cl **Recibido:** 5 de enero de 2026.**Aprobado:** 5 de enero de 2026.**Publicado:** 25 de marzo de 2026.**Resumen**

Los incendios forestales han causado daños significativos en Chile en los últimos años, siendo la infraestructura eléctrica un potencial agente de inicio de estos incendios. Este trabajo describe una metodología para estimar el riesgo de incendios forestales asociado a una subestación eléctrica ubicada en la Interfaz Urbano-Silvestre de Valparaíso, Chile. El riesgo de incendio se define como el producto entre la probabilidad de que un incendio se inicie en la subestación y la probabilidad de ignición del combustible vegetal aledaño. La primera probabilidad se determinó con un árbol de eventos, mientras que de la probabilidad de ignición se estimó a partir de datos experimentales de ignición versus flujo de calor. La altura e intensidad de las llamas fueron estimadas con modelos simples desarrollados para incendios de derrames. La probabilidad de que un incendio se genere en la subestación fue de $1,92 \times 10^{-7}$ eventos/año, con lo cual el riesgo de incendio se estimó entre un valor cercano a cero y 2×10^{-7} eventos/año. Esta metodología ofrece una interpretación integral del riesgo, que considera tanto la probabilidad de ocurrencia de un incendio como la propensión de combustibles vegetales a encenderse ante tal evento, constituyendo una herramienta interesante para evaluar cuantitativamente dicho riesgo en infraestructuras industriales y así proponer medidas de mitigación apropiadas.

Palabras clave: riesgo; incendio forestal; radiación térmica; ignición; árbol de eventos.**Abstract (English Version)**

Wildfires have caused significant damage in Chile in recent years, with electrical infrastructure being a potential ignition source for these events. This study describes a methodology for estimating the wildfire risk associated with an electrical substation located in the Wildland–Urban Interface of Valparaíso, Chile. Wildfire risk is defined as the product of the probability that a fire originates in the substation and the probability of ignition of the surrounding vegetation fuels. The first probability was determined using an event tree, while the ignition probability was estimated from experimental data relating ignition to heat flux. Flame height and intensity were estimated using simplified models developed for spill fires. The probability of a fire originating in the substation was estimated at 1.92×10^{-7} events/year, resulting in a wildfire risk ranging from a value close to zero up to 2×10^{-7} events/year. This methodology provides a comprehensive interpretation of risk, considering both the probability of fire occurrence and the propensity of nearby vegetation fuels to ignite under such conditions. It therefore represents a useful tool for quantitatively evaluating wildfire risk in industrial infrastructures and for proposing appropriate mitigation measures.

Keywords: risk; wildfire; thermal radiation; ignition; event tree.

2026 Volumen 1 Número 1	Gonzalo Severino, Andrés Fuentes, Pedro Reszka	PÁG. 51
-------------------------------	--	---------

1. Introducción

Los incendios forestales extremos ocurridos en Chile en la última década constituyen una de las consecuencias más palpables del cambio climático [1]. En 2017, los incendios en la zona central de Chile causaron 11 muertes y quemaron más de 550.000 ha [2], de las cuales 190.000 ha pueden atribuirse al incendio de Las Máquinas, siendo así el incendio más devastador en la historia de Chile [3]. Un conjunto de incendios en el centro-sur de Chile en febrero de 2023 quemó más de 450.000 ha y causó 26 muertes [4]. En febrero de 2024, múltiples incendios que se iniciaron en la Reserva Natural Peñuelas quemaron aproximadamente 15.000 ha, extendiéndose rápidamente al área urbana de Viña del Mar, destruyendo más de 6.000 viviendas y causando al menos 134 muertes [5], la mayor cifra de muertes por incendio forestal en la historia de Chile. Este problema se ha visto exacerbado por el aumento de la Interfaz Urbano-Silvestre (Wildland-Urban Interface, WUI), que es donde las áreas construidas y las zonas silvestres se encuentran o entremezclan, y que alberga a millones de personas en Chile [6]. Para apoyar la toma de decisiones en esta materia, una opción interesante es implementar herramientas basadas en el análisis cuantitativo del riesgo, cuya componente principal es la modelación física de un incendio en conjunto con un análisis probabilístico de las consecuencias de la liberación de energía desde el incendio [7].

2. Metodología para el análisis cuantitativo del riesgo de incendios

En la literatura se pueden encontrar una gran cantidad de métodos para determinar el riesgo de incendio con diversos grados de complejidad. En el ámbito industrial, un peligro de incendio es cualquier sustancia capaz de causar daño cuando se libera bruscamente o reacciona químicamente liberando energía en el proceso, tales como gases tóxicos, líquidos corrosivos, fluidos a presión y materiales inflamables. Los métodos de análisis de riesgos se clasifican en:

- **Cualitativos.** Estos métodos se basan en identificar los factores que afectan al riesgo, para luego realizar una evaluación de estos factores basándose en un conjunto de valores de referencia [8]. Algunos de estos métodos son: listas de verificación, análisis *what-if*, auditorías de seguridad, análisis de tareas, gráficos de eventos cronometrados secuencialmente (*Sequentially Timed Event Plotting*, STEP) y estudios de peligros y operabilidad (*Hazard and Operability*, HAZOP), entre otros [9]. Estos métodos son fáciles de implementar en protocolos y procedimientos de seguridad. Sin embargo, no es posible obtener una estimación numérica del riesgo con ellos, lo que dificulta su aplicación sistemática.
- **Semicualitativos.** Estos métodos se caracterizan por asignar un valor numérico al nivel de riesgo, estimándolo como el producto de dos o más cantidades asociadas a la frecuencia y las consecuencias de los eventos identificados en categorías que representan órdenes de magnitud [8]. Algunos métodos son la Evaluación de Riesgos Proporcionales (*Proportional Risk Assessment Technique*), la Evaluación de Riesgos por Matriz de Decisión (*Decision Matrix Risk Assessment*, DMRA) y el Análisis de Riesgos y Errores Clínicos (*Clinical Risk and Error Analysis*) [9]. Estos métodos son relativamente económicos y fáciles de implementar y, de ser necesario, pueden complementarse con una modelación física del problema. Sin embargo, existe un grado significativo de subjetividad inherente al análisis pues se basa en el juicio de expertos, supervisores y empleados.
- **Cuantitativos.** Estos enfoques buscan predecir un nivel discreto de riesgo mediante una combinación de modelos probabilísticos y/o físicos para predecir la frecuencia de ciertos eventos y sus posibles consecuencias [8], considerando al riesgo como una cantidad medible y expresada comúnmente como el producto entre la probabilidad del resultado y sus consecuencias [10]. Algunos enfoques en boga desde la década de 1970 son la evaluación cuantitativa de escenarios en cadena (*Quantitative Assessment of Domino Scenarios* [11]), el análisis de

riesgos a la sociedad (*Societal Risk Analysis* [12]) y el Análisis de Riesgo Individual (*Individual Risk Analysis* [10]). Los dos últimos se denominan colectivamente Análisis Cuantitativo de Riesgos (*Quantitative Risk Analysis*, QRA) y serán el objeto de análisis a continuación.

El QRA es una metodología orientada a cuantificar el riesgo de incidentes industriales de forma sistemática. Fue conceptualizada en la década de 1950 por la industria nuclear [13] y adaptada por la industria química y de procesos en la década de 1970 tras varios accidentes masivos en Europa que involucraron la liberación descontrolada de materiales peligrosos [14]. El objetivo del QRA es identificar escenarios de incidentes, estimar su probabilidad de ocurrencia y evaluar sus riesgos al determinar la probabilidad de diversas consecuencias y el impacto potencial de dichas consecuencias (Fig. 1).

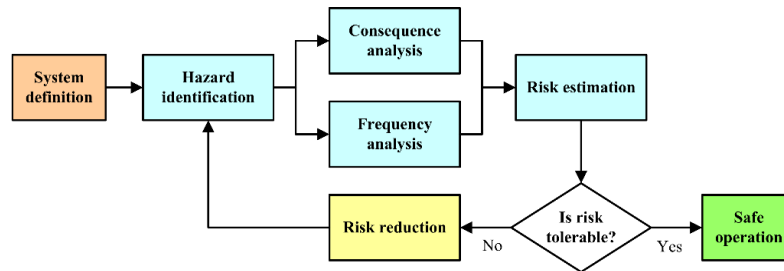


Figura 1. Pasos de un análisis cuantitativo del riesgo de incendio [10].

En primer lugar, se debe definir el sistema a estudiar e identificar y caracterizar las sustancias potencialmente peligrosas contenidas en este. A continuación, se establecen los escenarios resultantes de una posible pérdida de contención en cualquier equipo que almacene materiales peligrosos. Para ello, una herramienta útil es un árbol de eventos, que consiste en una secuencia ramificada de eventos a partir de un evento iniciador, donde cada evento posterior al iniciador está condicionado a la ocurrencia de su evento precursor, asumiendo los resultados de cada evento precursor como binarios (éxito o fracaso, sí o no). Los puntos finales de cada rama son los posibles escenarios que puedan surgir a partir del evento iniciador [15]. Las consecuencias de estos escenarios se modelan físicamente para determinar el grado de exposición de potenciales objetivos. Las consecuencias asumen la forma de una probabilidad de daño, estimada en términos del grado de exposición mediante funciones de respuesta. Finalmente, el riesgo en un punto dado desde la ubicación del evento inicial generalmente asume que las contribuciones de todos los escenarios son aditivas [10]:

$$R_{x,y} = \sum_i R_{x,y,i} = \sum_i P_{O,i} \cdot P_{d,i} \quad (1)$$

donde $R_{x,y,i}$ es el riesgo correspondiente al escenario i , $P_{O,i}$ es su probabilidad de ocurrencia y $P_{d,i}$ son sus consecuencias, representadas por una probabilidad de daño.

3. Caso de estudio: aplicación en una subestación eléctrica

La base de un QRA aplicado a la estimación del riesgo de incendio es el análisis estadístico de los datos recopilados sobre incendios anteriores. Una limitación de este enfoque es que estos datos suelen ser insuficientes para predecir incendios catastróficos caracterizados por baja frecuencia y consecuencias altas, ya que las frecuencias y las consecuencias generalmente se promedian en un intervalo determinado. Por lo tanto, el análisis de datos históricos mediante árboles de eventos u otras técnicas lógicas es más adecuado para eventos más frecuentes, como lo son la descarga de fluidos inflamables y combustibles, la ignición de mezclas inflamables y la probabilidad de éxito (o fracaso) de los sistemas de protección contra incendios. Si bien las consecuencias de un incendio también pueden estimarse analizando datos históricos, plasmados en funciones simples, se recomienda modelar físicamente los escenarios de riesgo con el fin de cuantificar de mejor manera los posibles impactos en el objetivo analizado. A continuación, se aplica la metodología QRA para estimar el riesgo de incendio debido a un mal funcionamiento o incidente que inicie un incendio en una subestación eléctrica.

3.1. Definición del sistema

El sistema es una subestación eléctrica ubicada en la interfaz urbano-silvestre del sector de Placilla, comuna de Valparaíso, región de Valparaíso, Chile (coordenadas 33°06'30"S y 71°33'32"O; véase la Fig. 2). Esta subestación está rodeada de áreas silvestres y urbanizaciones. La Fig. 3 muestra un esquema de la subestación. Los peligros de incendio corresponden a materiales inflamables susceptibles de ignición, por lo que, en este caso, se supuso que el principal riesgo en la instalación es un charco de aceite de transformador.

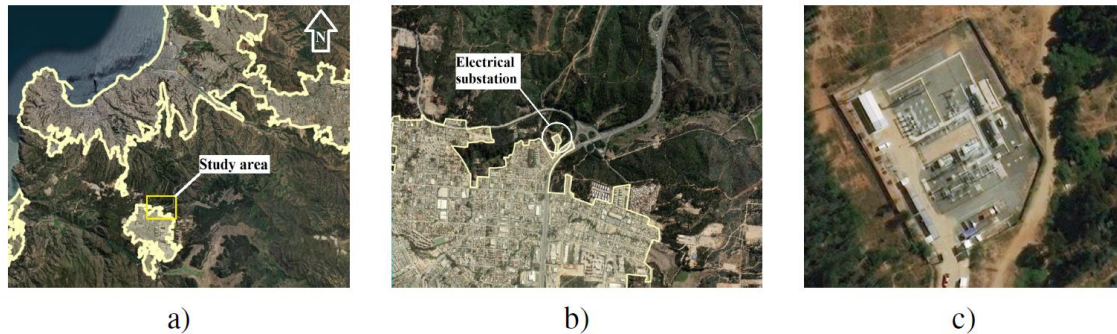


Figura 2. a) Conurbación de Valparaíso, su interfaz urbano-silvestre y el área de estudio (rectángulo amarillo); b) Área de estudio; c) Vista aérea de la subestación analizada.

3.2. Probabilidad de ocurrencia

En general, aproximadamente 1,5 % los incendios forestales tienen su origen en igniciones producidas por infraestructura eléctrica [16]. Registros históricos en California muestran que aproximadamente el 3% de los incendios forestales se origina en líneas eléctricas [17], mientras que, bajo condiciones climáticas normales, la fracción de incendios atribuidos a líneas eléctricas constituye el 1% en el sur de California y 1,5% en el estado de Victoria, Australia [18]. Dado que el clima de ambos estados es similar al de la región de Valparaíso, se supuso que la fracción de incendios atribuidos a la infraestructura eléctrica en Valparaíso es el promedio de estas cifras (1,8%). Además, si se supone que la frecuencia de incendios forestales es aquella estimada en la Ref. [7], la frecuencia de ignición atribuida a infraestructura eléctrica se estima en $0,018 \times 7,36 \times 10^{-5} = 1,32 \times 10^{-6}$ eventos/año. En la Fig. 3 se muestra un árbol de eventos para los posibles escenarios a partir de un incendio en la subestación. La primera pregunta se relaciona con la efectividad de los sistemas de detección de incendios, cuya probabilidad de éxito es del orden del 95% [19], por lo que consideró como 90% pues los equipos de la subestación están instalados al aire libre, lo que dificulta la detección de incendios. La efectividad de los sistemas de supresión de incendios se supuso en 95%, valor que representa un promedio para varios sistemas basados en rociadores [19]. Sin embargo, esta efectividad depende del éxito de la detección, por lo que se supuso que el sistema de supresión no se activa si el incendio no se detecta previamente. Con estos supuestos, la probabilidad de que un incendio se propague fuera de la subestación se estima en $5,96 \times 10^{-8} + 1,32 \times 10^{-7} = 1,92 \times 10^{-7}$ eventos al año (Fig. 3).

Initiating event	Is the fire detected?	Is the fire controlled?	Outcome
Ignition within the substation 1.32E-06 (events/year)	Yes 0.90	Yes	Fire contained in the substation 1.13E-06
		No	Fire spreads outside 5.96E-08
	No 0.10	Yes	Fire contained in the substation 0.00E+00
		No	Fire spreads outside 1.32E-07
		1.00	

Figura 3. Árbol de eventos con posibles escenarios a partir de un incendio en una subestación eléctrica.

3.3. Consecuencias

Para estimar físicamente las consecuencias de un incendio, es necesario considerar una geometría y una tasa de quemado determinadas. La manera más simple de modelar un incendio en una subestación es considerarlo como un incendio de charco (*pool fire*). Este tipo de incendios se origina cuando un hidrocarburo se libera abruptamente desde un recipiente presurizado, luego de lo cual se produce una ignición en los vapores provenientes del charco resultante. De este modo, el campo de radiación térmica alrededor del charco de fuego puede evaluarse mediante procedimientos de cálculo típicos de la ingeniería de seguridad contra incendios [20]. Posteriormente, para evaluar cómo responderá ante esta exposición térmica un objetivo situado a una cierta distancia del incendio, en el suelo y orientado hacia arriba, para emular la respuesta de la vegetación circundante.

3.3.1. Exposición térmica

En ingeniería de incendios, un *pool fire* circular típicamente se modela como un cilindro sólido de radio y altura conocidos (Fig. 4), con lo cual el campo de radiación térmica en torno al incendio depende de la geometría de la llama, las propiedades radiativas de la llama y la configuración espacial entre la llama y el objetivo a analizar [21].

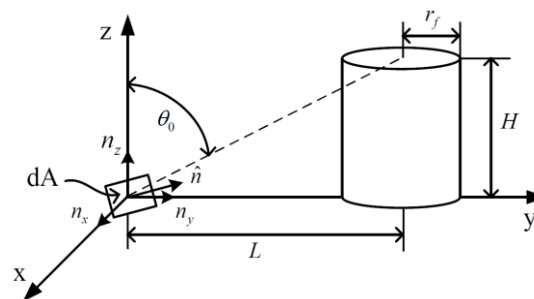


Figura 4. Incendio modelado como un cilindro sólido con el fin de estimar el flujo de calor por radiación incidente sobre un objetivo.

- **Geometría de la llama.** En la literatura existen diversas correlaciones entre la geometría de la llama y la tasa de combustión. Una de las más utilizadas es la correlación de Heskestad [22]:

$$H = 0,23 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D \quad (2)$$

donde H es la altura visible de las llamas (en m), D es el diámetro del charco (en m) y \dot{Q} es la tasa de liberación de calor (en kW), la cual puede calcularse en términos del flujo másico de combustible evaporado por unidad de área (\dot{m}''), el poder calorífico del combustible (ΔH_c) y la eficiencia de la combustión (η_{comb}) como:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta H_c \cdot \eta_{comb} \quad (3)$$

Una correlación empírica para el flujo másico del combustible por unidad de área es:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot \exp(1 - \kappa \cdot b \cdot D) \quad (4)$$

donde \dot{m}''_{∞} es una tasa asintótica de pérdida de masa, κ es el coeficiente de extinción-absorción de la llama, y b es un factor de corrección por la longitud óptica media en la llama [22].

- **Propiedades radiativas de la llama.** La radiación térmica desde incendios se debe a la emisión de gases calientes y hollín. Si se desprecia la emisión de gases calientes, la emisividad media del hollín en una llama sólida cilíndrica se puede modelar como [23]:

$$\epsilon = 1 - \exp \left[-0,7 \left(\frac{\kappa_s D}{\sin(\theta_0/2 + \pi/4)} \right) \right] \quad (5)$$

donde κ_s es el coeficiente efectivo de extinción-absorción de la llama y θ_0 es el ángulo subtendido entre el eje vertical de coordenadas y la línea que va desde el objetivo hasta el centro superior de la llama sólida (Fig. 4). El coeficiente de extinción-absorción se puede estimar como:

$$\kappa_s = 3,72 \frac{C_0}{C_2} f_{v,s} T_s \quad (6)$$

donde $C_2 = 1,4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ es la segunda constante de Planck, $f_{v,s}$ es la fracción volumétrica del hollín, T_s es la temperatura del hollín y C_0 es una constante que depende del índice de refracción del hollín ($m = n - ik$) como [24]:

$$C_0 = \frac{36 \pi n k}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4 n^2 k^2} \quad (7)$$

- **Flujo superficial de calor incidente sobre un objetivo.** El siguiente modelo permite determinar el flujo de calor radiante incidente sobre un objetivo diferencial de superficie dA ubicado a una distancia $L \geq 1.5 D$ del eje de la llama [23]:

$$\dot{q}_r = \epsilon \sigma T_s^4 (F_1 + F_2 + F_3) \quad (8)$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann, la emisividad ϵ está dada por la Ec. (5), y F_1 a F_3 son los factores de forma entre la llama sólida y el objetivo, expresados como:

$$F_1 = \frac{n_x}{4\pi} \left(\frac{D}{2L} \right)^2 (\pi - 2\theta_0 + \sin(2\theta_0)) \quad (9a)$$

$$F_2 = \frac{n_y}{2\pi} \left(\frac{D}{2L} \right)^2 (\pi - 2\theta_0 + \sin(2\theta_0)) \quad (9b)$$

$$F_3 = \frac{n_z}{\pi} \left(\frac{D}{2L} \right) \sin^2(\theta_0) \quad (9c)$$

donde $\hat{n} = (n_x, n_y, n_z)$ es el vector unitario normal del objetivo.

El marco teórico representado por las Ecs. (2) a (9) se usó para realizar cálculos considerando diámetros de charco entre 5 a 25 m. Se consideró aceite de transformador como el combustible derramado, cuyas propiedades se resumen en la Tabla 1. Con estos parámetros, el flujo másico de evaporación del combustible, la tasa de liberación de calor y la altura de la llama de los incendios de charco se calculan con las Ecs. (2) a (4), obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 2. Otros supuestos y consideraciones son:

- Se desprecia la transmisividad atmosférica entre el incendio y el objetivo.
- Se considera un objetivo pequeño situado a nivel del suelo, mirando hacia el cielo. Por lo tanto, $n_z = 1$ y $n_x = n_y = 0$ (Fig. 4) y $F_1 = F_2 = 0$ en la Ec. (9).
- Se suponen las siguientes propiedades para el hollín: fracción en volumen $f_{v,s} = 10^{-6}$, temperatura $T_s = 1500 \text{ K}$, e índice de refracción complejo $m = 1,8 + 0,5i$ [24], por lo tanto $n = 1,8$ y $k = 0,5$ en la Ec. (7). Por lo tanto, utilizando la Ec. (6) el coeficiente de extinción del hollín se estima como $\kappa_s = 14,1 \text{ m}^{-1}$.

Dado que las Ecs. (8) y (9) son aplicables para $L \geq 1.5 D$, la distancia mínima desde el eje del incendio para los cálculos siguientes fue la correspondiente al máximo diámetro de charco considerado (25 m), por lo tanto $1.5D_{max} = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ m}$. Las curvas de flujo de calor incidente resultantes para todos los diámetros se muestran en la Fig. 5. Estas curvas representan

el grado de exposición térmica a la que se vería expuesto un objetivo situado a nivel del suelo fuera de la subestación analizada.

Tabla 1. Propiedades del aceite de transformador [22].

ΔH_c (MJ/kg)	\dot{m}''_{∞} (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	$\kappa \cdot b$ (m ⁻¹)	η_{comb}
46,4	0,039	0,7	0,7

Tabla 2. Geometría de un incendio de charco en una subestación eléctrica.

D (m)	\dot{m}'' (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	\dot{Q} (MW)	H (m)
5	0,0378	28	8,9
10	0,0390	114	14,5
15	0,0390	256	18,9
20	0,0390	455	22,7
25	0,0390	711	26,0

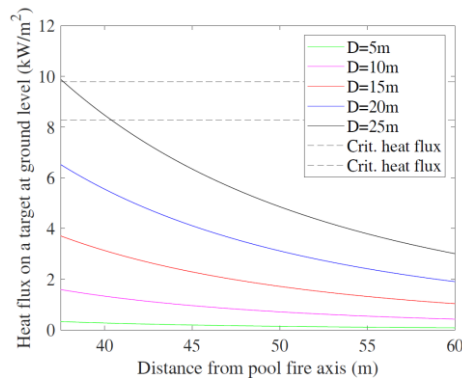


Figura 5. Flujo de calor radiativo incidente sobre un objetivo desde un *pool fire*, para diversos diámetros del mismo.

3.3.2. Respuesta del objetivo ante una exposición térmica

Para evaluar la respuesta del objetivo, se debe aplicar una función de respuesta apropiada, que vincule el flujo de calor recibido por el objetivo con su probabilidad de ignición. Para ello se supuso que en el suelo alrededor de la subestación se encuentran combustibles forestales constituidos principalmente por hojarasca vegetal. Cuando un combustible forestal recibe calor desde una fuente externa, a una cierta temperatura ocurre su pirólisis, un proceso endotérmico mediante el cual una fracción del sólido se descompone en una mezcla de especies gaseosas combustibles. La ignición corresponde al inicio de una combustión sostenida en el tiempo de estos gases de pirólisis [25]. El criterio consensuado por la comunidad de combustión para determinar si hay una ignición se define en términos de un flujo de calor crítico, el cual se determina extrapolando linealmente los resultados experimentales de una curva de flujo de calor versus el inverso del tiempo a la ignición [26].

Un enfoque alternativo considera la ignición como un problema de transición de fase, en la cual el tiempo a la ignición diverge o se anula según una ley de potencia universal cuando el flujo de calor tiende a un umbral dado por un valor crítico [27]. Para comprender esta transición de fase se define la probabilidad de ignición como $P_{ig} = N_{ig}/N_{tot}$, donde N_{ig} es el número de experimentos de ignición exitosos y N_{tot} es el número total de repeticiones bajo las mismas condiciones experimentales. Por lo tanto, la probabilidad de ignición aumenta de 0 al 100% a medida que el flujo de calor incidente aumenta en el rango crítico (Fig. 6). La forma sigmoideal de esta transición de fase se puede linealizar como sigue. La función *probit* es la inversa de la

función de distribución acumulada (FDA) de la distribución de probabilidad normal, generando una variable aleatoria Y (la variable *probit*) para cada probabilidad acumulada [10]. Por lo tanto, si la transición de fase en la Fig.6 se modela como una FDA de la distribución normal estándar, la probabilidad de ignición se relaciona con la variable *probit* Y y el flujo de calor mediante una función integral no disponible de forma cerrada, pero que puede estimarse mediante métodos aproximados [10]. De esta forma, se genera una relación lineal entre la variable *probit* y el logaritmo natural del flujo de calor. Para ello, a los flujos de calor más bajo y alto en la Fig.6, correspondientes a probabilidades de ignición del 1% y del 99%, respectivamente, se asignaron los valores 2.67 y 7.33 para las correspondientes variables *probit*. Luego se determinó la siguiente relación lineal a partir de estos dos valores y el logaritmo del flujo de calor:

$$Y = -55.9660 + 27.7602 \cdot \log(\dot{q}_e'') \quad (10)$$

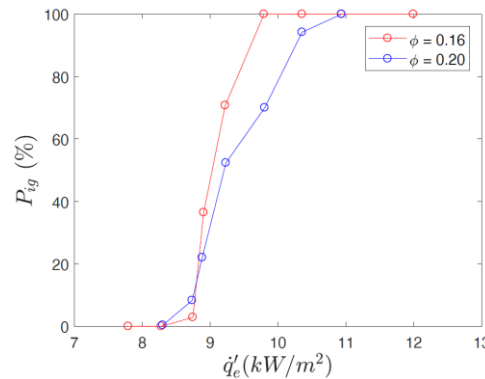
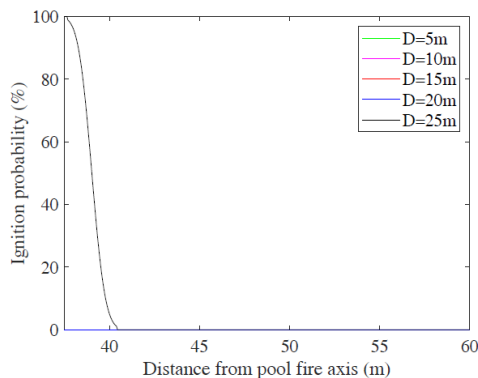
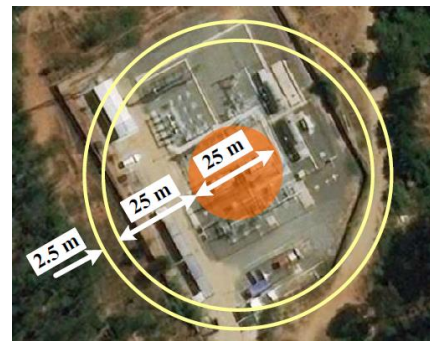


Figura 6. Probabilidad de ignición de agujas de pino (*Pinus halepensis*) en función del flujo de calor incidente, para dos porosidades ϕ . Para cada flujo de calor se realizaron 50 repeticiones experimentales [27].

Según la Fig. 6 el rango de flujo de calor crítico para muestras de agujas de pino con porosidad 0,20 es entre 8,28 y 9,79 kW/m². Este rango se representa con dos líneas horizontales punteadas en la Fig. 5, donde se observa que solo un charco de diámetro 25 m generaría un incendio capaz de emitir la radiación térmica suficiente como para inducir la ignición del combustible situado en un radio de 40 m o más desde el eje del charco. Utilizando la Ec. (10), y convirtiendo las variables *probit* en probabilidades de ignición con la aproximación indicada en la Ref. [10], la Fig. 7a muestra las curvas de probabilidad de ignición resultantes. En este gráfico se observa que la ignición de combustibles forestales es improbable para distancias superiores a 40 m, mientras que la probabilidad de ignición es cercana al 100% para distancias inferiores a 37,5 m. Por lo tanto, estas dos distancias delimitan el área de influencia de un incendio de charco de 25 m de diámetro iniciado dentro de la subestación, como se ilustra en la Fig. 7b.



a)



b)

Figura 7. a) Probabilidad de ignición del combustible forestal en función de su distancia desde un incendio de diámetro variable, suponiendo al combustible forestal de agujas de pino de *Pinus halepensis*; b) Vista aérea de la subestación analizada, representando al incendio de charco de mayor diámetro (25 m, en anaranjado), junto con dos curvas cerradas que representan probabilidades de ignición de 100% (círculo interior) y 0% (círculo exterior).

3.4. Riesgo de incendio

Considerando la definición dada por la Ec. (1), el riesgo que representa un incendio de charco de 25 m de diámetro dentro de la subestación analizada para los combustibles del suelo circundante se estima como la multiplicación entre la probabilidad de que este incendio se propague fuera de la subestación ($1,92 \times 10^{-7}$ eventos/año) y la curva de probabilidad de ignición mostrada en la Fig. 7b. Esto da como resultado la curva de riesgo mostrada en la Fig. 8, observándose que el riesgo disminuye desde aproximadamente 2×10^{-7} eventos/año a casi cero eventos por año entre 37,5 y 40 m. Esto sugiere que una franja de tierra libre de combustible de aproximadamente 5 m de ancho reduciría considerablemente este riesgo de incendio.

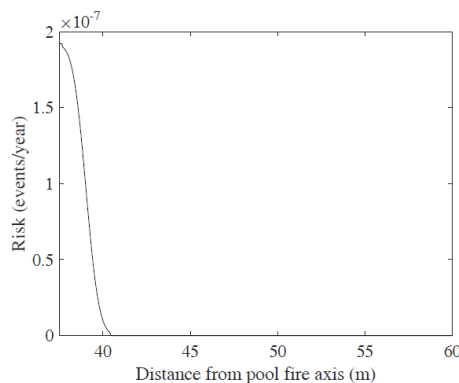


Figura 8. Riesgo de incendio representado por un incendio de charco de 25 m de diámetro iniciado dentro de una subestación eléctrica.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología cuantitativa para estimar el riesgo de incendio forestal que representa la infraestructura eléctrica. Esta metodología se aplicó para evaluar el riesgo que representa una subestación eléctrica ubicada en Valparaíso, Chile central. La probabilidad de que un incendio dentro de la subestación analizada se propague al exterior de esta depende de los sistemas de detección y supresión presentes en la subestación. En este trabajo se consideró el derrame de aceite de un transformador como el escenario más factible, aunque en general, en ámbitos industriales estos escenarios son de baja probabilidad en comparación con escenarios en zonas residenciales o comerciales. Por otra parte, si se considera un incendio que ya se propagó hacia el exterior de la subestación, las consecuencias del incendio se pueden modelar físicamente considerándolo como un sólido de geometría y propiedades radiativas conocidas. Suponiendo al incendio como un cilindro, se determinó el factor de forma entre el cilindro y un objetivo de tamaño pequeño situado en el suelo y orientado hacia arriba, con lo cual se determinó el flujo de calor incidente sobre el objetivo, correspondiendo a la exposición térmica del incendio. Con esta información, se evaluó la respuesta del objetivo suponiéndolo como un lecho vegetal compuesto por agujas de pino, cuya probabilidad de ignición se modeló mediante una curva lineal entre la variable probit y el logaritmo del flujo de calor. Finalmente, el riesgo de incendio se determinó como el producto entre la probabilidad de que un incendio propague hacia fuera de la subestación, y la probabilidad de que un combustible vegetal a nivel de suelo experimente ignición, arrojando como resultado un riesgo de 2×10^{-7} eventos/año para un objetivo situado a $< 37,5$ m del incendio, entre 2×10^{-7} y cero eventos por año si está entre 37,5 y 40 m, y cercano a cero para distancias mayores a 40 m. Esta metodología ofrece una

visión integral del riesgo, al incorporar el uso de datos históricos y la modelación física del incendio. Algunas limitaciones del presente estudio son el que se tuvo en cuenta el análisis de un solo tipo de equipo dentro de la subestación, y que no se consideró la generación de chispas desde cables eléctricos, el cual es un escenario factible y que se ha observado en algunos eventos de incendios previamente.

5. Referencias

- [1] T. Carrasco-Escaff, R. Garreaud, D. Bozkurt, M. Jacques-Coper, & A. Pauchard, "The key role of extreme weather and climate change in the occurrence of exceptional fire seasons in south-central Chile," *Weather and Climate Extremes* 45, 100716, 2024. DOI:10.1016/j.wace.2024.100716
- [2] D. M. J. S. Bowman et al., "Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires," *Ambio* 48:4, 350–362, 2018. DOI:10.1007/s13280-018-1084-1
- [3] J. Valdivia, I. Avila, F. Auat-Cheein, A. Fuentes, & P. Reszka, "Anatomy of the Las Máquinas wildfire using remote sensing tools," in *Advances in Forest Fire Research 2022*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 2022, pp. 517–526.
- [4] Naciones Unidas Chile, "Chile: Incendios forestales 2023. Reporte de Situación No. 5.," Mar. 2023. Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://reliefweb.int/report/chile/chile-incendios-forestales-2023-sistema-de-naciones-unidas-report-de-situacion-no-5-al-30-de-marzo-de-2023>.
- [5] C. I. Galleguillos Ketterer, J. L. Valin Rivera, J. Díaz Millar, and M. Santander López, "An Experimental Study on Fire Propagation and Survival in Informal Settlements," *Fire* 8:8, 290, 2025. DOI: 10.3390/fire8080290
- [6] P. Sarricolea et al., "Recent wildfires in Central Chile: Detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface," *Science of The Total Environment* 706, 135894, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135894>
- [7] G. Severino, A. Fuentes, A. Valdivia, F. Auat-Cheein, & P. Reszka. "Assessing wildfire risk to critical infrastructure in central Chile: application to an electrical substation," *International Journal of Wildland Fire* 33, WF22113, 2024. DOI:10.1071/WF22113
- [8] G. Ramachandran & D. Charters, *Quantitative Risk Assessment in Fire Safety*. Spon Press, 2011.
- [9] P. Marhavilas, D. Koulouriotis & V. Gemeni, "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24, 477–523, 2011. DOI:10.1016/j.jlp.2011.03.004.
- [10] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2nd ed. Wiley-Interscience, 1999.
- [11] V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni, & S. Zanelli, "The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis," *Journal of Hazardous Materials A* 127, 13–30, 2005. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.003.
- [12] S. Kaplan & B. Garrick, "On The Quantitative Definition of Risk," *Risk Analysis* 1:1, 11–27, 1981. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
- [13] D. Okrent, "The safety goals of the U.S. Nuclear Regulatory Commission," *Science* 236:4799, 296–300, 1987. DOI: 10.1126/science.3563510.
- [14] H. Pisman and G. Reniers, "Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP)," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 28, pp. 2–9, 2014. DOI:10.1016/j.jlp.2013.03.004.
- [15] J. D. Andrews and S. J. Dunnett, "Event-tree analysis using binary decision diagrams," *IEEE Transactions on Reliability* 49:2, 230–238, 2000. DOI:10.1109/24.877343.
- [16] S. Jazebi, F. de León, & A. Nelson, "Review of Wildfire Management Techniques—Part I: Causes, Prevention, Detection, Suppression, and Data Analytics," *IEEE Transactions on Power Delivery* 35:1, 430–439, 2020. DOI:10.1109/TPWRD.2019.2930055.
- [17] S. Jazebi, F. de León, and A. Nelson, "Review of Wildfire Management Techniques—Part II: Urgent Call for Investment in Research and Development of Preventative Solutions," *IEEE Transactions on Power Delivery* 35:1, 440–450, 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2930095.

2026 Volumen 1 Número 1	Gonzalo Severino, Andrés Fuentes, Pedro Reszka	PÁG. 60
-------------------------------	--	---------

- [18] J.W. Mitchell, "Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions," *Engineering Failure Analysis* 35, 726–735, 2013. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.006.
- [19] G. Taylor, S. Cooper, A. D'Agostino, N. Melly, & T. Cleary, "Methods to quantify smoke detection performance in risk-informed engineering application," in *Suppression, Detection, and Signaling Research and Applications Conference*, NFPA, College Park, MD, 2017.
- [20] Y. Chen, J. Fang, X. Zhang, Y. Miao, Y. Lin, R. Tu, & L. Hu, "Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances," *Progress in Energy and Combustion Science* 95, 101070, 2023. DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101070.
- [21] C. L. Beyler, "Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2591–2663. M. J. Hurley, Ed. Springer, 2016.
- [22] B. Karlsson & J. G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, 2000.
- [23] A. Dayan & C. Tien, "Radiant heating from a cylindrical fire column," *Combustion Science and Technology* 9:1-2, 41–47, 1974. DOI: 10.1080/00102207408960335
- [24] C. Tien, K. Lee, & A. Stretton, "Radiation Heat Transfer," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 102–137. M. J. Hurley, Ed. Springer, 2016.
- [25] R. Parot, J. I. Rivera, P. Reszka, J. L. Torero, & A. Fuentes, "A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes," *Combustion and Flame* 237, 111866, 2022. DOI:10.1016/j.combustflame.2021.111866.
- [26] V. Babrauskas, *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers, 2003.
- [27] F. Sabi, S. Terrah, O. Mosbah, et al., "Ignition/non-ignition phase transition: A new critical heat flux estimation method," *Fire Safety Journal* 119, 103257, 2021. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103257.

Declaración ética

Conflicto de Interés: Nada que declarar. **Financiamiento:** Nada que declarar. **Revisión por Pares:** Doble ciego.



Todo el contenido de la RIMCEO — Revista de Activos de Ingeniería en Mantenimiento, Confiabilidad y Excelencia Operacional, está licenciada bajo Creative Commons, a menos que se especifique lo contrario o se trate de contenido recuperado de otras fuentes bibliográficas.