



Estudio de Arco Eléctrico en Pozos Petroleros Aplicando Normas IEEE STD.1584 y NFPA 70E

Arc Flash Study In Oil Wells Applying IEEE STD. 1584 and NFPA 70E

Guevara G, Claudia A. [Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2364-1225](https://orcid.org/0000-0003-2364-1225)
claudiaguevara@chevron.com / Chevron Global Services

Torres R, Nerly F. [Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3089-7325](https://orcid.org/0000-0003-3089-7325)
nerlytorres@gmail.com / Universidad Rafael Urdaneta

Valero H. Andrés A. [Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4320-7565](https://orcid.org/0000-0003-4320-7565)
andressvh21@gmail.com / Universidad Rafael Urdaneta

Resumen

El objetivo general de la investigación estuvo dirigido en estudiar el arco eléctrico en pozos petroleros aplicando normas IEEE std.1584 y NFPA 70E, fundamentada en las normas estandarizadas y el Consejo Australiano de Energía AEC. La metodología fue de tipo descriptiva, de diseño documental no experimental y transversal. El estudio se realizó en cuatro fases: en la primera fase, se recolectaron los diagramas unifilares, datos y especificaciones de operación del sistema, se diagnosticó la normativa vigente de seguridad eléctrica dentro de la empresa, así como también se verificaron cuáles son los estándares para el cálculo de la energía incidente. En la segunda fase se logró la base de datos para realizar los estudios. En la tercera fase se estudió el cortocircuito para obtener la corriente en la barra y bombas de extracción obteniendo la energía incidente. Por último, en la cuarta fase, se seleccionó el Equipos de Protección Personal (EPP) requerido según los resultados tomando como base la norma NFPA 70E, se elaboraron las etiquetas de advertencia y el documento técnico a entregar. En los resultados obtenidos se evidenciaron los tipos de bombeo Balancín y BCP el EPP apropiado en la categoría de 0, mientras que para el tipo BES corresponde a la categoría 1. Las etiquetas de advertencia diseñadas son apropiadas para el ambiente de riesgo en las instalaciones de Campo Boscán.

Palabras clave: Arco eléctrico, pozos petroleros, protección personal, cortocircuito, protecciones

Abstract

The general objective of the research was aimed at studying the electric arc in oil wells applying IEEE std.1584 and NFPA 70E standards, based on standardized norms and the Australian Energy Council AEC. The methodology was descriptive, with a non-experimental and cross-sectional documentary design. The study was carried out in four phases: in the first phase, the one-line diagrams, data and operating specifications of the system were collected; the current electrical safety regulations within the company were diagnosed, as well as the standards for the calculation of the incident energy. In the second phase, the database was obtained to carry out the studies. In the third phase, the short circuit was



studied to obtain the current in the bus and extraction pumps, obtaining the incident energy. Finally, in the fourth phase, Personal Protective Equipment was selected, according to the results based on the NFPA 70E standard, the warning labels and the technical document to be delivered were prepared. The results obtained showed the types of pumping Rocker and BCP the appropriate PPE in the category of 0, while for the type BES it corresponds to category 1. The warning labels designed are appropriate for the risk environment in the installations of Boscán field.

Key words: Electric arc, oil wells, personal protection, short circuit, protections

Introducción

La seguridad en el ámbito eléctrico es muy importante para salvaguardar la vida de los trabajadores que día a día operan con equipos energizados bien sea para realizar un mantenimiento o trabajos de rutina, debido al alto riesgo que se presenta al realizar trabajos relacionados con la energía eléctrica se han establecido normativas que regulan los equipos de protección a utilizar, las distancias que se deben respetar y el riesgo eléctrico que representa determinada actividad en el lugar de trabajo especialmente en trabajos eléctricos.

Debido a los riesgos implicados en el trabajo y maniobra de equipos eléctricos energizados a diferentes niveles de tensión, es importante tener en cuenta que sin la protección adecuada los riesgos de realizar trabajos con energía eléctrica son elevados y estos pueden ser graves e incluso fatales. Actualmente existen normativas que establecen los deberes y derechos de las empresas en el ámbito de seguridad eléctrica con sus trabajadores para garantizar la seguridad de los mismos en el área de trabajo, así como también deben notificar los riesgos presentes en las áreas en las que estos vayan a realizar determinados trabajos con equipos eléctricos energizados.

Por otra parte el fenómeno de arco eléctrico tiene un alto riesgo sobre los trabajadores que puedan sufrir de un evento de este tipo, este fenómeno puede causar graves lesiones e incluso la muerte, debido a que este es un fenómeno que no se puede erradicar sino que solo se puede reducir su recurrencia, así como su incidencia sobre los trabajadores y debido a los riesgos que tiene la ocurrencia de este fenómeno en el área de trabajo es necesario estudiar el arco eléctrico y sus riesgos para minimizar los daños ocurridos sobre los operarios de los equipos eléctricos donde se pueda presentar un evento de este tipo.

Debido a lo ya mencionado, se decidió realizar el presente estudio el cual tiene como objetivo determinar los requerimientos de seguridad eléctrica fundamentada en el cálculo de la energía incidente en los equipos de operación y aplicando las normas IEEE std. 1584 y la NFPA 70E cuando se presenta un arco eléctrico y de esta forma disminuir el impacto del fenómeno sobre los trabajadores y así protegerlos contra los riesgos del arco eléctrico con base en el cálculo de la energía incidente en el lugar de la falla para determinar el equipo de protección personal que se debe utilizar para cada área de trabajo.



Objetivo General

Estudiar el arco eléctrico en pozos petroleros aplicando normas IEEE std.1584 y NFPA 70E.

Objetivos Específicos

Identificar los diagramas, datos y especificaciones del arco eléctrico en pozos petroleros.

Establecer un estudio de cortocircuito para analizar el arco eléctrico en pozos petroleros.

Seleccionar el equipo de protección personal (EPP) mediante la norma NFPA 70E para adecuar las etiquetas de advertencias.

Metodología

La investigación fue del tipo descriptiva (Bavaresco, 2013), la cual consiste en describir características homogéneas de los fenómenos sobre la realidad. Bajo un diseño documental (Arias, 2016) por la búsqueda de fuentes impresas y electrónicas y el posterior análisis de la información recolectada en función de un esquema preliminar, también catalogó como no experimental transversal (Hernández, Fernández y Baptista, 2014), puesto que se centró en las relaciones de la variable, analizando los fenómenos, eventos o contextos en un punto único en el tiempo.

La muestra se constituyó por las barras en las que se encuentran conectadas las bombas de tipo BES, BCP y Balancín, correspondientes a motores de 60HP, 150HP y 418HP. La data se adquirió en Campo Boscán, a través de la empresa Confurca, Pozos BES: BN-514-A, BN-842, BN-154, BN-657, BN-657, BN-600. POZOS BCP: BN507, BN-820, BN-622, BN-747. Pozos Tipos Balancín: BN-386, BN-739, BN-739.

La validez y confiabilidad se estableció a través de la revisión por parte de dos ingenieros electricistas, expertos en sistemas de alta tensión pertenecientes a las empresas Confurca y Chevron de la empresa mixta Petroboscan. Este trabajo de investigación se realizó en cuatro (4) fases: en la primera fase, se recolectaron los diagramas unifilares disponibles, datos y especificaciones de operación del sistema en cuestión, se diagnosticó bajo qué normativa se rigen los procedimientos de seguridad eléctrica dentro de la empresa, así como también se verificó cuáles son las normas o estándares para el cálculo de la energía incidente.

Durante la segunda fase, luego de obtener la base de datos existente por parte de la empresa objeto de estudio, se revisó y depuró para realizar los estudios correspondientes. En la siguiente fase 3, se realizó el estudio de cortocircuito para obtener la corriente de cortocircuito en la barra posterior a las diferentes bombas de extracción, con este dato se procedió a realizar el estudio de arco eléctrico y así se obtuvo la energía incidente. Por último, en la fase 4, se seleccionó el equipo de protección personal (EPP) requerido según los resultados obtenidos tomando como base la norma NFPA 70E, asimismo, se adecuaron las etiquetas de advertencia arrojadas por el software, y se realizó el documento técnico a entregar a la empresa.



Fundamentos Teóricos

Arco Eléctrico

El arco eléctrico o arqueo de falla según el Australian Energy Council AEC (2019), ocurre cuando una corriente fluye entre el aire y una fase conductora o entre una fase conductora y la tierra; el arco eléctrico se puede describir como un corto circuito en el aire que produce un arco de manera violenta. Recientes descubrimientos han demostrado su peligro a través del plasma expulsado mediante la radiación energética proveniente del arco eléctrico y su energía recibida.

Por lo tanto, la naturaleza del arco eléctrico según AEC (2019) puede derretir y vaporizar conductores y materiales donde la transición de sólido a vapor es el resultado de la ola de presión de rápida expansión. La alta presión puede fácilmente generar una fuerza de cientos o miles de kilos por metros cuadrados, que dentro de una industria puede romper los tímpanos, colapsar pulmones y lanzar de las escaleras a los trabajadores. Materiales y metales fundidos serían expulsados debido al arco eléctrico a una velocidad de 1120 km/hr que pueden penetrar fácilmente el cuerpo humano.

El arqueo eléctrico, según el estándar 1584 de la IEEE (2002) puede ser generado por las siguientes causas:

- a. Impurezas y Polvo: Las impurezas y polvo en la superficie del aislamiento pueden proporcionar un camino para la corriente, permitiendo un flashover y creando la descarga del arco a través de la superficie. Esto puede desarrollar un mayor arqueo.
- b. Corrosión de los equipos: Puede proporcionar impurezas en la superficie del aislamiento, debilitando el contacto entre las terminales de los conductores e incrementando la resistencia de contacto a través de la oxidación u alguna otra contaminación corrosiva.
- c. Condensación del vapor y el goteo del agua: Pueden crear un camino en la superficie de los materiales aislantes. Esto puede crear un flashover a tierra y la intensificación del potencial del arco de fase a fase.
- d. Contacto accidental con la exposición de las partes vivas puede iniciar una falla.
- e. Caída de Herramienta: La caída accidental de la herramienta puede causar un cortocircuito momentáneo, produciendo chispas e iniciando el arco.
- f. Sobre-Voltajes a través de espacios estrechos: Cuando el espacio de aire entre conductores de diferentes fases es muy estrecho (debido a la mala calidad o al daño de los conductores), el arco puede ocurrir durante el sobre-voltaje temporal.
- g. Falla de los materiales aislantes.
- h. Utilización o diseño inapropiado del equipo.
- i. Procedimientos de trabajo inapropiados.



Riesgo de arco eléctrico

La exposición a un arco eléctrico ocurre cuando hay una manipulación por parte del personal hacia un equipo eléctrico, ya sea con el fin de realizar un trabajo de maniobra, reparación o un mantenimiento. La estadística de accidentes de arco eléctrico de acuerdo al Industrial Safety & Hygiene News indican que en Estados Unidos ocurren 30 mil accidentes por año, de los cuales 7 mil resultan en quemaduras, 2 mil hospitalizaciones y 400 fatalidades al año (Arc flash statistics en ISHN, 2013).

Equipos de Protección Personal (EPP)

Según la Lopcymat (2005), son todos aquellos equipos designados para ser usados sobre el cuerpo, para crear una barrera de protección contra absorción, inhalación, o contacto físico con riesgos químicos, radiológicos, biológicos, ergonómicos y mecánicos que se pueden encontrar en el área de trabajo.

Diagrama Unifilar

Según la NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace), la representación de un sistema eléctrico legible y actualizado es indispensable para su estudio, mantenimiento, operación o trabajo. En el cual, demanda al propietario o a la persona a cargo del sistema eléctrico mantener el diagrama unifilar en condiciones legibles y actualizado a cambios realizados. El diagrama unifilar consta de líneas, símbolos estandarizados e información de los equipos involucrados.

Además, dependiendo del tipo de estudio, operación o trabajo a realizar, puede haber diferentes diagramas justo con la información necesaria. Por ejemplo, para un estudio de cortocircuito será necesario presentar un diagrama con las impedancias de los equipos que aportan a la corriente de cortocircuito; no obstante, en un estudio de protecciones, dicha información no sería necesaria.

Levantamiento Artificial

Para Márquez, R (2016) cuando cesa la producción del pozo por flujo natural, se requiere el uso de una fuente externa de energía para lograr conciliar la oferta con la demanda; la utilización de esta fuente externa de energía en el pozo con fines de levantar los fluidos desde el fondo del pozo hasta el separador es lo que se denomina levantamiento artificial.

Entre los métodos de Levantamiento Artificial de mayor aplicación en la Industria Petrolera se encuentran: el Levantamiento Artificial por Gas (L.A.G), Bombeo Mecánico (B.M), Bombeo Electro-Centrífugo Sumergible (B.E.S), Bombeo de Cavidad Progresiva (B.C.P) y Bombeo Hidráulico (B.H).

El objetivo de los métodos de Levantamiento Artificial es minimizar los requerimientos de energía en la cara de la arena productora con el objetivo de maximizar el diferencial de presión a través del yacimiento y provocar, de esta manera, la mayor afluencia de fluidos sin que generen problemas de producción: migración de finos, arenamiento, conificación de agua o gas, entre otros.



Bombeo Mecánico

Según Márquez (2016), es el sistema de Levantamiento Artificial más utilizado en pozos de baja producción en yacimientos de avanzado estado de agotamiento. El sistema consiste en una bomba recíprocante conectada a la superficie por medio de una sarta de cabillas, las cuales son impulsadas por un equipo de izamiento mecánico ubicado en superficie llamado balancín. Pueden ser utilizados en pozos verticales o desviados, este método permite producir pozos sometidos a inyección de vapor.

Asimismo, para Ocando (2015), el bombeo mecánico es el método de levantamiento artificial más usado a nivel mundial. Este método consiste en una bomba de subsuelo de acción recíprocante, que se abastece con energía producida a través de una sarta de cabillas. La energía proviene de un motor eléctrico o de combustión interna, el cual moviliza a una unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas.

Bombeo Electrosumergible

Para Peñafiel (2015) es un sistema integrado de levantamiento artificial, considerado como un medio económico y efectivo para levantar altos volúmenes de fluido desde grandes profundidades en una variedad de condiciones de pozo. Es más aplicable en yacimientos con altos porcentajes de agua y baja relación gas-aceite. Por otra parte, Benavides y Ruz (2009) señalan que el principio de funcionamiento de este método se basa en la operación continua de una bomba centrífuga multietapas cuyo requerimiento de potencia lo suministra un motor eléctrico de inducción, alimentado de energía por un cable de potencia que va hasta la superficie

Bombeo por Cavidad Progresiva

Según Figueroa y Tibaduisa (2016,) definen el Bombeo por Cavidades Progresivas (BCP), como un sistema de levantamiento artificial que presenta alta eficiencia con respecto a los otros sistemas de levantamiento, ya que puede extraer entre un 50% a 60% de la producción de fluidos medianos ($22 < ^\circ\text{API} < 29,9$) o pesados ($^\circ\text{API} < 21,9$) en el pozo donde se instale.

Las BCP son bombas de desplazamiento positivo (las cavidades se encuentran selladas hidráulicamente entre sí) que cuentan con un cabezal de accionamiento, el cual se ubica en superficie y una bomba de fondo que se compone por un rotor de acero en forma helicoidal el cual gira dentro de un estator de elastómero sintético o de metal en un tubo de acero.

Resultados

Normativas aplicables en el estudio de arco eléctrico.

Existe una variedad de normativas y estándares referentes al estudio de arco eléctrico, cuya información logró ser utilizada para el cálculo de la energía incidente y el equipo de protección personal a ser utilizado en el área de trabajo. Se revisaron las normas y leyes

nacionales (Pdvsa, 2006) y (Lopcymat, 2005), tanto internacionales (IEEE, 2002 / NFPA, 2015) se hicieron comparaciones entre las mismas y se llegó a la conclusión que la IEEE 1584 y la NFPA 70E poseen los métodos de cálculo para la energía eléctrica y otros factores, pero sin embargo la NFPA 70E abarca el EPP necesario según los resultados de energía incidente obtenidos.

En este sentido, la Lopcymat es una ley que regula las normativas de seguridad del país, mientras que la norma Pdvsa IR-S-17 aplica para todas las actividades operaciones realizadas por personal de la empresa o contratistas, la cual consiste en notificar a todos los trabajadores los riesgos a los cuales se expondrán, y su finalidad es acatar las leyes propuestas por la Lopcymat, debido a que ambas se encargan de velar por la seguridad laboral de todos los trabajadores que estén expuestos a riesgos en el trabajo.

Descripción del sistema eléctrico de Campo Boscán

El sistema eléctrico Campo Boscán se describe iniciando con la alimentación eléctrica que está constituida por dos subestaciones eléctricas llamadas KM48 y Z9, donde la subestación KM48 está constituida por un transformador de potencia de tres devanados, con una capacidad de 15/20 MVA, 138/24kV y un grupo de conexión Yny0nd1. Posee un arreglo de barra simple seccionada y alimenta a los circuitos Zuliana, Alcabala, C11 y C16 por medio de líneas aéreas de distribución de 24kV desplegadas por el campo.

Por otro lado, la subestación Z9 está constituida por tres transformadores de potencia de tres devanados, con una capacidad de 25/33/42MVA, 138/21kV y un grupo de conexión de YnYn0-D. De la misma forma, la subestación posee una configuración de barra simple más barra de transferencia. A su vez, alimenta los circuitos Z-10, Z-81A, Z-81B, Z-20A, Z-10A, Z-83, Z9-L1, Z9-L2, Z-10, Z-82 y Z-82A por medio de líneas aéreas de distribución de 24 kV desplegadas por el campo. A continuación, se presentan ambas subestaciones en la base de datos utilizando el programa ETAP ®:

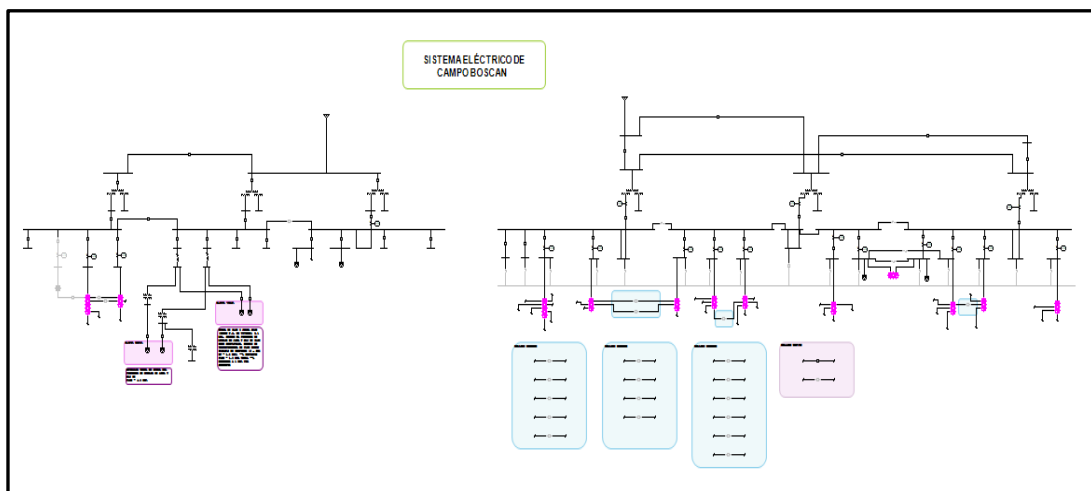


Figura 1. Diagrama unifilar general en ETAP®.
Fuente: Pretroboscan S.A (2018)

Dentro del modelo se toman en cuenta las líneas de distribución aéreas, donde se utilizaron los modelos de línea corta. A su vez, se considerará un transformador de distribución existente en la red eléctrica de distribución de Campo Boscán, el cual es de tipo montado en poste con una relación de transformación de 24 kV /480 V. El conexionado siempre será estrella con neutro en el primario y delta en el secundario con toma central de uno de los transformadores puesto a tierra, para el modelado se representarán con la conexión Yd, ya que el programa no dispone de la conexión anteriormente descrita. Además, se encuentran sumergidos en aceite (OA) y tienen una temperatura de operación de 55/65 °C.

La capacidad del banco de transformadores dependerá directamente del método de levantamiento artificial y se mencionan a continuación:

- Para Sistemas de Cavidad Progresiva (BCP, 60 HP): 75 kVA.
- Para Sistemas de Bombeo Electromecánico (Balancín, 150 HP): 150 kVA.
- Para Sistemas de Bombeo Electro Sumergible (BES, 418 HP): 501 kVA.

Asimismo, dentro de los tableros adyacentes a los diferentes tipos de pozos para extracción de petróleo, se encuentra fijado un breaker de potencia, el interruptor tiene un tiempo de despeje para fallas instantáneo de un máximo alrededor de 30 m/Seg. Por lo tanto, existe un número significativo de motores dentro de la red eléctrica de Campo Boscán. Es necesario considerar estas alimentaciones a la red de 24 kV bajo condiciones de falla. Estos motores se construirán en ETAP ® ingresando su potencia nominal, factor de potencia, eficiencia, tensión nominal y número de polos. Donde existen los siguientes tipos de extracción de petróleo, según Baker Hughes GE (2018):



Figura 2. Bombas de cavidad progresiva – 70HP (GE Oil & Gas, 2014)
Fuente: Baker Hughes GE (2018)

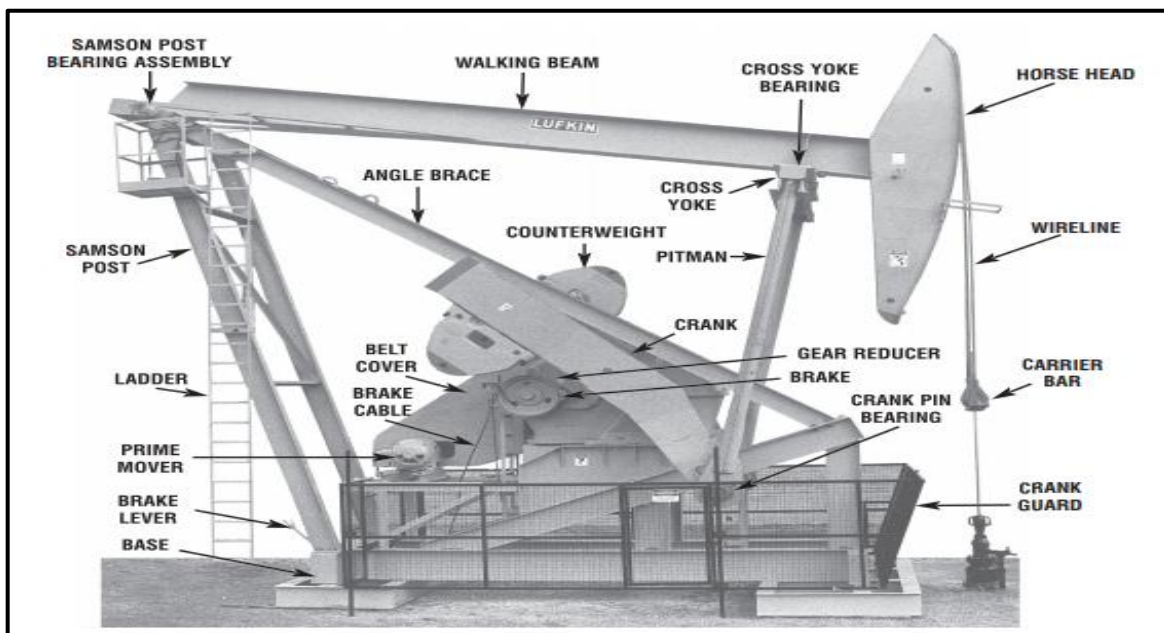


Figura 3. Unidad bombeo Mark II, GE Oil & Gas, Bombeo Electro Sumergible (BES): 418 HP.
Fuente: Baker Hughes GE (2018)



Figura 4. Bomba electro-sumergible 30-1,000 HP (GE Oil & Gas)
Fuente: Baker Hughes GE (2018)



Elementos de la base de datos

La empresa PetroBóscan, cuenta con una amplia gama de elementos constituyentes de su sistema eléctrico, para el correcto proceder de sus actividades laborales en un ambiente seguro contando con una desarrollada base de datos que se presenta a continuación, la cual consta de líneas aéreas, barras, transformadores, interruptores, pozos, circuitos y varios tipos de suministros eléctricos detallando sus ubicaciones, dimensiones y potencias:

- a. Equivalentes de Thévenin de las entradas de suministro eléctrico de transmisión de las Subestaciones Kilómetro 48 y Zulia 9.
- b. Líneas aéreas de transmisión eléctrica de 138 kV.
- c. Barras de 138 kV.
- d. Transformadores existentes 138 / 24 kV pertenecientes a las subestaciones Kilómetro 48 y Zulia 9 (Cuatro (4) transformadores existentes).
- e. Barras de 24 kV.
- f. Interruptores de Potencia en 24 kV.
- g. Circuitos existentes (Nombrados anteriormente).
- h. Líneas aéreas de distribución eléctrica de 24 kV.
- i. Transformadores existentes 24 / 0,48 kV del sistema de distribución.
- j. Pozos (Equipos de fondo y superficie).
- k. Cuchillas seccionadoras.

Equipos de protección por arco eléctrico

En la siguiente tabla 1 se estipulan las categorías de arco con sus respectivas energías incidentes según NFPA 70E (2009) que permite la selección del EPP a utilizar según la categoría de arco:

Tabla 1.
Categorías de arco

Categoría	Rango
0	Hasta 1,2 Cal/cm ²
1	Desde 1,2 hasta 4 Cal / cm ²
2	Desde 4 hasta 8 cal / cm ²
3	Desde 8 hasta 25 cal / cm ²
4	Desde 25 hasta 40 cal / cm ²

Fuente: NFPA 70E (2009)



Selección de casos de estudio

A la hora de realizar las simulaciones, se tomará como muestra 11 bombas por cada tipo de bombeo, dicha muestra fue tomada según su ubicación geográfica, al norte, sur, este, oeste y al centro de la red de distribución de Campo Boscán. A continuación, se muestran los pozos seleccionados según su tipo de bombeo, ubicados en los mapas del plano general de líneas eléctricas de distribución de 24KV, Campo Boscán, datos Año 2006. Numero de plano: ELEC-PCP-600-9.

Tabla 2.
Bombas tipo BES seleccionadas para los estudios

ID	514-A	842	154	657-B	600	234	841	805	142	596	620
Circuito	11	16	Z20	Z82	Z83	Z10-A	Z20-A	Z81-A	Z81-B	Z82-A	Z10
Tipo	BES										
HP	418										

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Tabla 3.
Bombas tipo BCP seleccionadas para los estudios

ID	507	820	622	747	594	839	804	807	224	227	145-A
Circuito	11	16	Z20	Z82	Z82	Z20-A	Z81-A	Z81-B	Z81-B	Z82-A	Z10
Tipo	BCP										
HP	60										

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Tabla 4.
Bombas tipo Balancín seleccionadas para los estudios

ID	386	739	208	737	117	709	771	125	189	170	628
Circuito	11	16	Z20	Z82	Z83	Z10-A	Z20-A	Z81-A	Z81-B	Z82-A	Z10
Tipo	Balancín										
HP	150										

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Simulaciones

Previamente a realizar el estudio de arco eléctrico es necesario obtener como dato fundamental la corriente de cortocircuito en la barra (tablero) que se encuentra posterior a la bomba en estudio, es por esto por lo que se realizó la simulación de cortocircuito, para una falla trifásica en el primer medio ciclo (1/2) y así obtener la máxima corriente de cortocircuito que se pueda presentar en el lugar de la falla. Se utilizó un tiempo de despeje de la falla de 30 m/Seg.



Luego, se ingresan los valores del cortocircuito obtenido anteriormente para así poder realizar las simulaciones del arco eléctrico, donde se obtienen los niveles de energía incidente, la categoría del arco y la distancia de aproximación. Debido a que los elementos involucrados tienen características semejantes y los niveles de riesgo de cada tipo de bomba son casi iguales entre ellos, se hizo un promedio de los pozos estudiados según el tipo de bombeo.

Después de realizados los cálculos correspondientes dan como resultado final, que las bombas tipo BES tienen un promedio de energía incidente de $1,7989(\text{Cal} / \text{cm}^2)$ y la categoría de arco 1, las bombas tipo BCP tienen un promedio de energía incidente de $0,3925(\text{Cal} / \text{cm}^2)$ y las bombas tipo Balancín tienen un promedio de $0,9693(\text{Cal} / \text{cm}^2)$, donde la categoría de arco de las dos últimas es 0.

Análisis de los resultados

Luego de obtenidos los valores de energía incidente, se presenta el equipo de protección personal que se debe utilizar para minimizar los riesgos de arco eléctrico de acuerdo al nivel de energía incidente presente en las barras estudiadas y siguiendo las bases de la norma NFPA 70E. A continuación, se presentan los resultados para los tres tipos de bombeo:

Tabla 5.
Equipo de Protección Personal para el Bombeo Mecánico (150 HP)

Bombeo Mecánico (150 HP)	
Energía Incidente (Cal / cm^2)	0,962
Distancia de Acercamiento (m)	0,409
Distancia de Trabajo (m.)	0,4572
Categoría	0
EPP Requerido	Ropa de algodón, camisa de mangas largas (Fibras Naturales), pantalón largo (Fibras Naturales), lentes de seguridad, protección auditiva, guantes de labor.

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Tabla 6.

Equipo de Protección Personal el Bombeo Electrosumergible (418 HP)

Bombeo Electrosumergible (418 HP)	
Energía Incidente (Cal / cm ²)	1,814
Distancia de Acercamiento (m)	0,562
Distancia de Trabajo (m.)	0,4572
Categoría	1
EPP Requerido	Ropa de algodón, camisa manga larga clasificada para protección de Arco Eléctrico, pantalón largo clasificado para protección de Arco Eléctrico, casco de seguridad con protección para la cara clasificada para protección de Arco Eléctrico, protección auditiva, guantes de labor, botas de seguridad dieléctricas

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Tabla 7.

Equipo de Protección Personal el Bombeo Electrosumergible (418 HP)

Bombeo de Cavity Progresiva (60 HP)	
Energía Incidente (Cal / cm ²)	0,391
Distancia de Acercamiento (m)	0,261
Distancia de Trabajo (m.)	0,4572
Categoría	0
EPP Requerido	Ropa de algodón, camisa de mangas largas (Fibras Naturales), pantalón largo (Fibras Naturales), lentes de seguridad, protección auditiva, guantes de labor

Fuente: Elaboración Propia (2018)

Diseño de etiquetas de advertencia

Con base a las etiquetas suministradas por el programa ETAP ® Power Station se procedió a modificarlas para adecuarlas con respecto a los resultados obtenidos en el estudio; estas etiquetas deberán ser impresas e instaladas, las cuales contendrán la siguiente leyenda: Riesgo de arco eléctrico, peligro de choque eléctrico, distancia de



seguridad de trabajo: límite de acercamiento, límite de protección por arqueo, acercamiento restringido, acercamiento prohibido, clase de camisa y pantalón, clase de lentes de protección personal requerido para cada tablero en cumplimiento con la IEEE std. 1584 y la NFPA 70E.

Conclusiones

Existen diferentes tipos de normativas y estándares referentes al arco eléctrico, las cuales pueden estar dentro del ámbito técnico o dentro del marco legal. Desde el ámbito internacional las normas IEEE Std. 1584 y NFPA 70E contienen ecuaciones para el cálculo de la energía incidente, sin embargo, la IEEE no abarca la selección del EPP, mientras que la NFPA 70E sí lo considera. Por otro lado, la regulación emanada por Lopcynt es una ley que regula las normativas de seguridad laboral del país, mientras que la norma Pdvsa IR-S-17 es una norma propia de la empresa que previamente notifica los riesgos a los cuales se expondrán los trabajadores.

Antes de realizar cualquier simulación fue necesaria la obtención del sistema eléctrico modelado por parte de la empresa Petroboscán, en la cual se adecuaron algunos parámetros dentro de la base de datos para poder realizar las simulaciones eléctricas bajo normativas internacionales y nacionales correspondientes que logre controlar el arco eléctrico en los pozos petroleros.

Es indispensable realizar previamente un estudio de cortocircuito, antes de abordar el estudio de Arco Eléctrico, el estudio de cortocircuito proporciona la magnitud de corriente en condiciones de falla, la cual junto con el tiempo de actuación de las protecciones eléctricas (Westinghouse Electric & Manufacturing Company, 1982), contra sobrecorriente determinan el nivel de energía incidente, que es un valor necesario para la selección del EPP. Los pozos con mayor cantidad de energía incidente son los de tipo BES, con una categoría de arco de nivel 1, mientras que las BCP y Balancín tienen una categoría de arco nivel 0.

Según los resultados obtenidos del estudio de arco eléctrico, considerando lo establecido en la norma NFPA 70E, se evidenció que para los tipos de bombeo Balancín y BCP el EPP apropiado es el de categoría 0, mientras que para el tipo BES corresponde a la categoría 1. Al mismo tiempo que, las etiquetas de advertencia diseñadas son técnicamente apropiadas para el ambiente de riesgo por Arco Eléctrico en las instalaciones de Campo Boscán, en ella aparecen figuras ilustrativas que señalan explícitamente el riesgo presente, complementadas con los valores de energía incidente, EPP a utilizar y distancias límites de aproximación, debidamente enmarcado en la norma NFPA 70E y las características particulares de la instalación.

Referencias Bibliográficas

- .Arias, F (2016) El proyecto de Investigación. Editorial Episteme. Séptima Edición. Caracas Venezuela.
- Australian Energy Council (2019) Electrical Arc Flash.Hazrd Managment Guideline
- Baker Hughes GE. (2018). *Lufkin Beam Pumping Units*. Obtenido de <https://www.bhge.com/sites/default/files/2018->



- Bavaresco, A. (2013) Proceso metodológico de investigación. Imprenta internacional. Maracaibo Venezuela.
- Benavides G. Cristhian C. y Ruz S., Marco A. (2009). Bombeo Electrosumergible y sistemas de control y monitoreo remoto de pozos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín. Colombia.
- ETAP (2018). Software de análisis de arco eléctrico de CA y CD en sistemas BT, MT y AT <https://etap.com/es>
- Figueroa, O. y Tibaduisa D. (2016) Selección del Método de Levantamiento Artificial y la Concentración de un Reductor de viscosidad en fondo de pozo para la extracción de crudo pesado en el pozo Torcaz 3. Fundación Universidad de América Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería de Petróleos Bogotá D.C. Colombia.
- GE Oil & Gas. (2014). *GrenCo*. Londres. Inglaterra. <https://www.ge.com>
- Hernández, Fernández y Batista. (2016) Metodología de la investigación. Mac Graw Hill Education. Sexta Edición. México.
- IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE Std. 1584 (2018).
- Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo (Lopcymat, 2005). Promulgada el 26 de julio de 2005 en Gaceta Oficial 38.236.
- Márquez, R. (2016) "Métodos de producción". Manual interno de la empresa mixta PDVSA Petrowayuu.
- NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace (NFPA, 2015)
- Ocando, L. (2015). Aspectos generales para la elaboración de estudios integrados de yacimientos. Pdvsa. Petrowayuu.
- Pdvsa. (2006). IS-R-17: Análisis de riesgos del trabajo. <http://www.pdvsa.com>
- Peñafiel S., J. (2015). Optimización del bombeo electrosumergible en la producción de petróleo. Editorial EAE. Ecuador.
- Square D. (2015). PowerPact h and L-Frame Circuit Breakers
- Westinghouse Electric & Manufacturing Company (1982). Applied Protective Relaying.. Westinghouse Electric Corporation. Relay-Instrument Division. New Jersey, EEUU