



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

“Análisis y diseño hidráulico optimizado de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos en la planta terminal Juliana”

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Luis Alberto ALCARRAZ ESPINOZA

ASESOR

Saúl Primitivo HORQUE FERRO

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Alcarraz, L. (2020). *Análisis y diseño hidráulico optimizado de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos en la planta terminal Juliaca*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

CODIGO ORCID DEL AUTOR:

CODIGO ORCID DEL ASESOR:

DNI: 21288864

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: NINGUNO

INSTITUCIÓN QUE FINANCIAS PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN: INVERSIÓN PROPIA

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS

12°03'30"S
77°05'00"O

AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:

ABRIL 2016 HASTA FEBRERO 2018



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS
MODALIDAD (M-1)

Siendo las 17:00 horas del martes 14 de enero de 2020, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES y con la asistencia del asesor MSc. Ing. SAÚL PRIMITIVO HORQUE FERRO, y miembros Ing. MARIO ALBERTO GARCÍA PÉREZ y Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

LUIS ALBERTO ALCARAZ ESPINOZA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller LUIS ALBERTO ALCARAZ ESPINOZA a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "ANÁLISIS Y DISEÑO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO POR ENFRIAMIENTO Y SOFOCACIÓN PARA TANQUES VERTICALES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS EN LA PLANTA TERMINAL JULIACA".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

Diecisiete

17

El Presidente del Jurado Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZALES, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller LUIS ALBERTO ALCARAZ ESPINOZA, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 18:10 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES MSc. Ing. SAÚL PRIMITIVO HORQUE FERRO
PRESIDENTE

Ing. MARIO ALBERTO GARCÍA PÉREZ
MIEMBRO

Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES
MIEMBRO

A Dios;

A mi tía Tomasa Espinoza por dedicar
su vida entera a educarme y guiarme por el
camino correcto. A mis padres Juan Justo y
Vilma por darme la vida, cariño y apoyo a pesar
de la distancia. A mis hermanos; en especial a
Edwin por ser como un padre y un gran
ejemplo de perseverancia y superación.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el análisis y diseño hidráulico optimizado de un sistema fijo de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación, para los nueve tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos dentro de las instalaciones de la planta terminal Juliaca, ubicada en la región Puno, mediante el uso del módulo Darwin Designer del software WaterCAD en su versión v8i; este módulo está basado en la teoría de “Algoritmos Genéticos (AG)” aplicado a la optimización de las redes de tuberías. Esta herramienta moderna permitió la búsqueda de las soluciones óptimas de tal manera que el costo de instalación de la red, así como los requerimientos que establece la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) sean mínimos.

Como estrategia de trabajo, inicialmente se desarrolló el análisis de escenarios probables de incendio en los nueve tanques de combustibles principales, en la zona de Islas y en la caseta de bombas, los mismos que se tuvieron en cuenta para el análisis hidráulico. Luego se procedió a determinar los caudales y presiones mínimas requeridas por el sistema de enfriamiento y sofocación usando una hoja de cálculo (excel). Asimismo, se realizó un modelo matemático de la red de tuberías del sistema de protección contra incendio utilizando software para la determinación de los diámetros óptimos. Finalmente se mostraron los resultados (en el mismo orden en el que se realizó la estimación de los diámetros óptimos) de las simulaciones realizadas para los dieciséis escenarios de incendio dentro de la Planta Terminal Juliaca, estos resultados de presión y caudal arrojados resultaron concordantes con los objetivos de la investigación, permitiendo garantizar el correcto funcionamiento del sistema de espuma y enfriamiento en cada escenario de incendio.

Palabras claves: Escenario de incendio, red de tuberías, diámetros óptimos, presiones mínimas.

ABSTRACT

The present work consists of the optimized hydraulic analysis and design of a fixed system of protection against fire by cooling and suffocation, for the nine vertical storage tanks of liquid hydrocarbons inside the facilities of the Juliaca terminal plant, located in the Puno region, by using the Darwin Designer module of the WaterCAD software in its v8i version; This module is based on the theory of "Genetic Algorithms (AG)" applied to the optimization of pipe networks. This modern tool established the search for optimal solutions in such a way that the cost of installing the network, as well as the requirements established by the National Fire Protection Association (NFPA) are minimal.

As a work strategy, let's experience the analysis of probable fire situations in the nine main fuel tanks, in the Islands area and in the pump house, the same ones that take into account for the hydraulic analysis. Then, the flow rates and minimum pressures required by the cooling and suffocation system were determined using a spreadsheet (excel). Likewise, a mathematical model of the fire protection system's pipe network was made using software to determine the optimal parameters. Finally, the results were carried out (in the same order in which the specification of the optimal parameters was made) of the simulations performed for the sixteen fire scenarios within the Juliaca Terminal Plant, these results of pressure and flow rates were consistent with the objectives of the investigation, specify the correct functioning of the foam system and specify in each fire scenario.

Keywords: Fire scenario, pipe network, optimal diameters, minimum pressures.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación e importancia	4
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes de estudio	5
2.2 Bases teóricas	6
2.2.1 Ecuaciones de energía en una tubería	6
2.2.2 Pérdidas de energía por fricción	8
2.2.3 Pérdidas locales	10
2.2.4 Ecuaciones de energía en un sistema de bombeo	11
2.2.5 Ecuación de descarga en orificios.....	12
2.2.6 Ecuación de emisores	12
2.3 Sistema de tuberías a presión	13
2.4 Métodos para el análisis de sistemas de tuberías.....	15
2.4.1 Método de Hardy Cross	16
2.4.2 Método del gradiente hidráulico:.....	17
2.5 Software WaterCAD para el diseño de redes de agua a presión.....	21
2.6 Módulo Darwin Designer	24
2.7 Teoría de incendios.....	29
2.7.1 Triángulo de fuego.....	29
2.7.2 Tipos de fuego	30
2.7.3 Tipos de propagación del fuego.....	31
2.7.4 Teoría de la extinción del fuego	31
2.7.5 Restricciones en la aplicación de los distintos métodos	32
2.8 Normatividad	33
CAPITULO III. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	35
3.1 Identificación y definición de variables	35
3.2 Hipótesis	35

CAPITULO IV: MARCO METODOLÓGICO	36
4.1 Tipo de investigación.....	36
4.2 Nivel de investigación	36
4.3 Diseño de la investigación	36
4.4 Población y muestra	36
CAPÍTULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
5.1 Información base del Terminal Juliaca	39
5.2 Criterios de combate de incendio	44
5.3 Sistema de sofocación en tanques.....	45
5.3.1 Determinación de parámetros iniciales.....	45
5.3.2 Caudales y presiones mínimas para el sistema de espuma	48
5.4 Sistema de enfriamiento en tanques.....	49
5.4.1 Parámetros iniciales	49
5.4.2 Parámetros mínimos requeridos en el aspersor más desfavorable	51
5.5 Sistema de extinción de incendio en cuarto de bombas.....	52
5.6 Escenarios probables de Incendio.....	56
5.6.1 Escenarios del 1 al 9: Incendio en Tanques de combustible.....	58
5.6.2 Escenarios del 10 al 15: Incendio en zona de Islas.....	67
5.6.3 Escenario 16: Incendio en la caseta de bomba	68
5.7 Modelo matemático de la red del SPCI	69
5.8 Criterio de optimización mediante Algoritmos Genéticos	74
5.8.1 Función objetivo de optimización	76
5.8.2 Funcionamiento de los algoritmos genéticos	78
5.9 Costo de instalación de tuberías del SPCI.....	87
5.10 Metodología para la estimación de los diámetros óptimos del SPCI	89
5.10.1 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 6.....	90
5.10.2 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°5	97
5.10.3 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°3	102
5.10.4 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 4	106
5.10.5 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°7	110
5.10.6 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°1	113
5.10.7 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°8	116
5.10.8 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°2.....	120
5.10.9 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°9	123
5.10.10 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 10	125
CAPITULO VI: RESULTADOS	129
6.1 Escenario N°6: Incendio en tanque TQ-9.....	129

6.2	Escenario N°5: Incendio en tanque TQ-8.....	134
6.3	Escenario N°3: Incendio en tanque TQ-6.....	139
6.4	Escenario N°4: Incendio en tanque TQ-7	144
6.5	Escenario N°7: Incendio en tanque TQ-10.....	149
6.6	Escenario N°1: Incendio en tanque TQ-1	153
6.7	Escenario N°8: Incendio en tanque TQ-11	158
6.8	Escenario N°2: Incendio en tanque TQ-5.....	163
6.9	Escenario N°9: Incendio en tanque TQ-30.....	167
6.10	Escenario N°10: Incendio en cuarto de bombas.....	171

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1: Descripción de tanques a proteger	41
Tabla 5.2: Número de salidas de descarga de espuma en tanques	46
Tabla 5.3: Rate de aplicación de espuma en salidas fijas	46
Tabla 5.4: Protección con descarga fija de espuma encima del sello para tanques de techo flotante (Open-Top)	47
Tabla 5.5: Factor K de cámaras espuma	48
Tabla 5.6: Factor K de descarga de generadores de espuma.....	48
Tabla 5.7: Parámetros mínimos del sistema de sofocación.....	49
Tabla 5.8: Parámetros mínimos del sistema de enfriamiento	51
Tabla 5.9: Escenarios probables de incendio	68
Tabla 5.10: Parámetros de la curva de la bomba contra incendio.....	73
Tabla 5.11: Precio de instalación de tuberías de Acero	87
Tabla 5.12: Precio de instalación de tuberías Hdpe	88
Tabla 5.13: Orden de análisis para la optimización de las tuberías	89
Tabla 6.1: Tres mejores Soluciones de la red de tuberías en el escenario 6	130
Tabla 6.2: Resultados de simulación para el escenario 6.....	131
Tabla 6.3: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 5	136
Tabla 6.4: Resultados de simulación para el escenario 5	136
Tabla 6.5: Soluciones de la red de tuberías en el escenario 3	140
Tabla 6.6: Resultados de simulación para el escenario 3	141
Tabla 6.7: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 4	145
Tabla 6.8: Resultados de simulación para el escenario 4.....	145
Tabla 6.9: Tres mejore soluciones de la red de tuberías en el escenario 7.....	150
Tabla 6.10: Resultados de simulación para el escenario 7.....	150
Tabla 6.11: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 1	154
Tabla 6.12: Resultados de simulación para el escenario 1	154
Tabla 6.13: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 8	159
Tabla 6.14: Resultados de simulación para el escenario 8.....	160
Tabla 6.15: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 2	164
Tabla 6.16: Resultados de simulación para el escenario 2.....	164
Tabla 6.17: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 9	168
Tabla 6.18: Resultados de simulación para el escenario 9.....	168
Tabla 6.19: Soluciones de la red de tuberías en el escenario 10	172
Tabla 6.20: Resultados de simulación para el escenario 10.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representación gráfica de energía en una tubería	7
Figura 2.2: Coeficientes de Hazen-Williams	10
Figura 2.3: Coeficientes de pérdidas locales.....	11
Figura 2.4: Sistema de bombeo.....	11
Figura 2.5: Descarga de agua a través de un Rociador	13
Figura 2.6: Sistemas de tuberías abiertas	14
Figura 2.7: Sistemas de tuberías cerradas	15
Figura 2.8: Sistemas de tuberías mixtas.....	15
Figura 2.9: Diagrama de flujo de los pasos principales en el método de gradiente.	21
Figura 2.10: Objetivo del tipo Minimizar el costo.....	25
Figura 2.11: Parámetros de Algoritmo Genético (AG).....	26
Figura 2.12: Progreso de ejecuciones	27
Figura 2.13: Triángulo de fuego	29
Figura 5.1: Vista de ubicación del Terminal Juliaca.....	40
Figura 5.2: Sistema de tuberías de combustibles	40
Figura 5.3: Condiciones climatológicas.....	44
Figura 5.4: Perfil de descarga de aspersor considerando 10,20 y 60 psi.....	50
Figura 5.5: Lista de aspersores con certificación UL y FM.....	51
Figura 5.6: Curvas densidad / área.....	53
Figura 5.7: Identificación de características de descarga de rociador.....	54
Figura 5.8: Rating de temperatura, clasificación y codificación de color.....	55
Figura 5.9: Adecuación del Sistema de Protección Contra Incendio del Terminal Juliaca	57
Figura 5.10: Incendio en tanque TQ-1	59
Figura 5.11: Incendio en tanque TQ-5	60
Figura 5.12: Incendio en tanque TQ-6	61
Figura 5.13: Incendio en tanque TQ-7	62
Figura 5.14: Incendio en tanque TQ-8	63
Figura 5.15: Incendio en tanque TQ-9	64
Figura 5.16: Incendio en tanque TQ-10	65
Figura 5.17: Incendio en tanque TQ-11	66
Figura 5.18: Incendio en tanque TQ-30	67
Figura 5.19: Plano de emplazamiento del Terminal Juliaca	70
Figura 5.20: Modelo detallado de la red en WaterCAD	71
Figura 5.21: Coeficiente de emisor en WaterCAD	73
Figura 5.22: curva de la bomba contra incendio	74
Figura 5.23: Red de tuberías simple.....	74
Figura 5.24: Algoritmo Genético aplicado al diseño óptimo de redes de agua	79
Figura 5.25: Población inicial	80
Figura 5.26: Operador de cruce.....	84
Figura 5.27: Operador de mutación	85
Figura 5.28: Red de Tuberías para el escenario N°6.....	90
Figura 5.29: Presiones mínimas de operación para escenario 6.....	95
Figura 5.30: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	96
Figura 5.31: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	97
Figura 5.32: Presiones mínimas de operación para escenario 5.....	99
Figura 5.33: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	100

Figura 5.34: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	101
Figura 5.35: Presiones mínimas de operación para escenario 3.....	103
Figura 5.36: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	104
Figura 5.37: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	105
Figura 5.38: Presiones mínimas de restricción para escenario N°4	107
Figura 5.39: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	108
Figura 5.40: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	109
Figura 5.41: Presiones mínimas de restricción para el escenario N°7	110
Figura 5.42: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	111
Figura 5.43: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	112
Figura 5.44: Presión mínima de restricción para escenario N°1	113
Figura 5.45: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	114
Figura 5.46: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	115
Figura 5.47: Presiones mínimas de restricción para escenario N°8	117
Figura 5.48: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	118
Figura 5.49: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	119
Figura 5.50: Presiones mínimas de restricción para escenario N°2	120
Figura 5.51: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	121
Figura 5.52: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	122
Figura 5.53: Presión mínima de restricción para escenario N°9	123
Figura 5.54: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	124
Figura 5.55: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	125
Figura 5.56: Presiones mínimas de restricción para escenario 16	126
Figura 5.57: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías.....	127
Figura 5.58: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación.....	128
Figura 6.1: Evolución de AG para el escenario N°6.....	129
Figura 6.2: Solución óptima para el escenario 6	132
Figura 6.3: Simulación optimizada para el escenario 6	133
Figura 6.4: Evolución de AG para el escenario N°5	134
Figura 6.5: Solución óptima para el escenario 5	137
Figura 6.6: Simulación optimizada para el escenario 5	138
Figura 6.7: Evolución de AG para el escenario N°3	139
Figura 6.8: Solución óptima para el escenario 3	141
Figura 6.9: Simulación optimizada para el escenario 3	142
Figura 6.10: Evolución de AG para el escenario N°4	144
Figura 6.11: Solución óptima para el escenario 4	146
Figura 6.12: Simulación optimizada para el escenario 4	147
Figura 6.13: Evolución de AG para el escenario N°7	149
Figura 6.14: Solución óptima para el escenario 7	151
Figura 6.15: Simulación optimizada para el escenario 7	152
Figura 6.16: Evolución de AG para el escenario N°1	153
Figura 6.17: Solución óptima para el escenario 1	155
Figura 6.18: Simulación optimizada para el escenario 1	156
Figura 6.19: Evolución de AG para el escenario N°8	158
Figura 6.20: Solución óptima para el escenario 8	161
Figura 6.21: Simulación optimizada para el escenario 8	162
Figura 6.22: Evolución de AG para el escenario N°2	163
Figura 6.23: Solución óptima para el escenario 2	165
Figura 6.24: Simulación optimizada para el escenario 2	166
Figura 6.25: Evolución de AG para el escenario N°9	167
Figura 6.26: Solución óptima para el escenario 9	169

Figura 6.27: Simulación optimizada para el escenario 9	170
Figura 6.28: Evolución de AG para el escenario N°10.....	171
Figura 6.29: Solución óptima para el escenario 10.....	173
Figura 6.30: Simulación optimizada para el escenario 10	174

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años, el mundo ha sido testigo de grandes incendios dentro de plantas de almacenamientos de petróleo y derivados como lo ocurrido en: Estados Unidos, dentro de las instalación de la planta petroquímica de British Petroleum(BP) en marzo de 2005; otro de los incendios de gran magnitud ocurrió en el depósito de almacenamiento de combustible de Buncefield ubicado a 24 km de Londres a finales del 2005; el 23 de octubre de 2009 se registró un incendio en varios tanques de la refinería de petróleo de la empresa Caribbean Petroleum Corporation(CAPECO) ubicado en la ciudad de Bayamón, Puerto Rico; en agosto de 2016 se presentó un incendio en tanques de petróleo de la compañía Puma Energy en Nicaragua; recientemente en octubre del 2018 se presentó un incendio en un tanque de almacenamiento de petróleo en la estación N° 5 del Oleoducto Nor Peruano ubicado en la región Loreto. Los casos mencionados muestran el alto riesgo que conlleva el almacenamiento de hidrocarburos líquidos, causando afectaciones humanas, ambientales y cuantiosas pérdidas económicas entre multas e indemnizaciones legales. De manera general, los factores que pueden provocar un incendio son diversos, sin embargo se puede atribuir a la falta de concientización de las empresas en la inversión de un sistema de protección contra incendios y al mantenimiento de los tanques. Por otro lado, a la falta de una normativa explícita en el tema, resulta necesario tener en cuenta lo siguiente:

[...] Siempre ha sido una preocupación para nuestros profesionales de seguridad a cargo de estas importantes instalaciones petroquímicas, cómo proponer soluciones efectivas a costos razonables. Uno de sus principales problemas ha sido encontrar una normativa que presente soluciones efectivas. Por ejemplo, hace algunos años API (American Petroleum Institute) trató de elaborar una norma para la protección contra incendios en refinerías. Esta norma se llamó API 2001. Pero luego de muchas

discusiones, API decidió descontinuarla pues sus miembros no pudieron llegar al consenso requerido para la elaboración de una norma efectiva. Esto de por sí es muy diciente en esta industria, donde las grandes corporaciones multinacionales petroleras han invertido tiempo y recursos, tanto en pruebas como en consultores externos, para encontrar la mejor solución al menor costo. Por consiguiente, estas multinacionales no han tenido interés en discutir abiertamente sus propias guías corporativas de seguridad y protección contra incendios [...] (Mocada, s.f).

De acuerdo a lo anterior, muchos de los diseños de sistemas contra incendios actuales están enfocados en cumplimiento de los parámetros de operación que garanticen el funcionamiento hidráulico dejando de lado el tema de optimización de redes de tuberías, esto es de entender por la complejidad que conlleva buscar las innumerables soluciones que garanticen el funcionamiento y que además represente el mínimo costo de instalación. El problema en particular que presenta los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos de la planta terminal Juliaca está asociado al riesgo de incendio que podría ocurrir debido a causas humanas, accidentales, eléctricas, ambientales, entre otros, ya que de ocurrir un incendio dentro de las instalaciones de la planta provocaría consecuencias catastróficas medio ambientales, económicas y humanas. Es por ello que desde un enfoque hidráulico y económico se plantea como solución la implementación de un sistema óptimo de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación que permita mitigar dicho riesgo.

1.2 Formulación del problema

El almacenamiento de 65,543.56 barriles de hidrocarburos líquidos distribuidos en nueve tanques verticales dentro de las instalaciones de la planta Terminal Juliaca, conlleva determinados riesgos de incendio y explosiones que provocarían daños importantes al medio ambiente, a la salud, a la vida de las habitantes de la zona y generando grandes pérdidas

económicas de cientos de millones de soles. Esta problemática se refleja mediante la siguiente formulación:

¿De qué manera se puede efectuar el análisis y diseño hidráulico optimizado de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos en la planta de combustible del terminal Juliaca?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar y realizar un diseño hidráulico óptimo de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos en la planta terminal de Juliaca mediante del uso de software WaterCAD.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estimar los diámetros óptimos de la red de tuberías de enfriamiento y sofocación
- Determinar los parámetros de operación como presión y caudal de la red de tuberías del sistema de enfriamiento y sofocación.
- Analizar y comparar los escenarios de incendios en los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.
- Determinar la capacidad de la fuente de entrega del sistema de protección contra incendio.

1.4 Justificación e importancia

La respuesta a la problemática planteada, será considerando en primer lugar la optimización del sistema. Al respecto, el costo de fabricar e instalar redes de tuberías es demasiado elevado, es decir representa aproximadamente el 70% del costo total de un proyecto. Es por tal motivo que resulta importante reducir el costo a través del estudio de los distintos diámetros comerciales que permitan encontrar soluciones óptimas dentro del análisis de redes hidráulicas. En segundo lugar, desde un enfoque preventivo de seguridad, es de suma importancia la implementación de un sistema de protección contra incendios dentro de las instalaciones del Terminal Juliaca que garantice salvaguardar vidas humanas y medio ambientales.

En términos generales, resulta importante mantener un enfoque hidráulico y económico cuando se realicen diseños de redes de tuberías contra incendio que permitan garantizar el funcionamiento hidráulico de modo que su construcción e instalación sea económicamente factible tanto para las instituciones públicas como privadas que operan plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio

- Gonzales, M, 2013. Trabajo de tesis para optar el título de especialista en Recursos Hidráulicos y Medio ambiente. Optimización de redes hidráulicas mediante aplicaciones de algoritmos genéticos y de recocido simulado utilizado en programas comerciales. El objetivo principal fue realizar la optimización de redes hidráulicas utilizando WaternetGen de Epanet usando la metodología de optimización basado en algoritmos genéticos y de recocido en la hidráulica de sistemas a presión. La conclusión principal que presenta la investigación es de que el uso de programas públicos o comerciales que estén basados en los algoritmos genéticos o de recocido simulado resultan ser una herramienta eficiente para resolver el problema altamente no lineal que existe a la hora de optimizar un sistema hidráulico de redes a presión. Además demostró a través de comparaciones con otros trabajos que los resultados obtenidos con el software Epanet - WaternetGen dan buenas soluciones cercanas al óptimo global.
- Lira, J. 2009. Trabajo de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico. Adecuación del sistema contra incendio de la planta MPE-1 en PDVSA Morichal al sur del estado de Mongs. El objetivo de su investigación consistió en realizar el diseño de adecuación del sistema contra incendios de la planta MPE-1 (Módulo de Producción y Emulsificación). En ella se evalúa el sistema contra incendio existente mediante variables como el caudal de agua que requiere la red de tuberías y cada dispositivo hidráulico con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas vigentes

de sistemas contra incendio (SCI). Asimismo llegó a la conclusión de que la metodología de evaluación usada en la tesis permitió saber las condiciones en las que se encontraba el sistema actual para luego opinar y sugerir variaciones técnicas de tal manera que el sistema satisfaga con las normas del SCI implantadas.

- Aguirre, M y Grimaldo, L. 2004. Tesis de grado para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Diseño hidráulico de sistemas contra incendio mediante simulación numérica. El objetivo principal de esta tesis fue el desarrollo de un modelo numérico para el flujo de agua en redes de tuberías, sistemas de rociadores, cálculos hidráulicos y dimensionamiento clásico de redes del sistema basadas en principios de la hidráulica, básicamente realizando un algoritmo para dar solución a las ecuaciones continuidad y energía. La conclusión relevante fue que el programa que elaborado en lenguaje de programación Pascal es capaz de simular el funcionamiento de instalaciones contra incendios conformados por rociadores automáticos de agua.

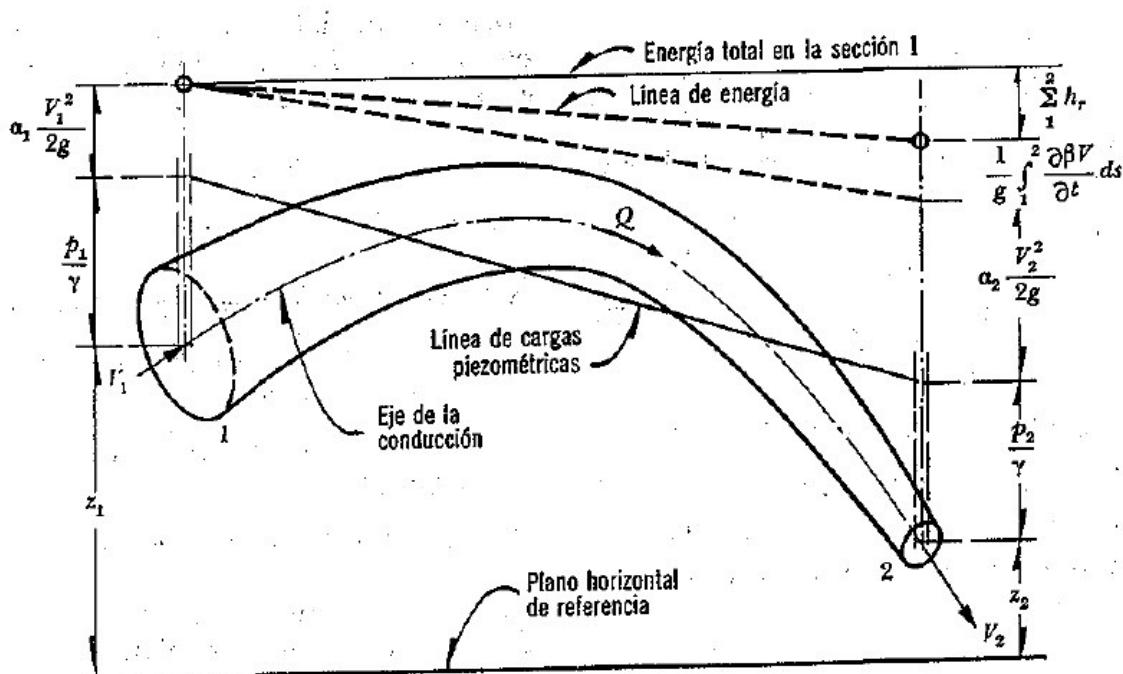
2.2 Bases teóricas

2.2.1 Ecuaciones de energía en una tubería

Para la explicación de las ecuaciones que gobierna el comportamiento de un fluido líquido dentro de un conducto, se considera una porción de tubería con sección variable como la mostrada en la figura 2.1, en ella se fija un punto inicial (1) y un punto final (2) pertenecientes al eje de conducción para la aplicación correcta de la ecuación de energía entre estos puntos. Además nótese que la posición de estos puntos se mide respecto a un plano de horizontal de referencia (generalmente respecto al nivel del mar) y que la línea de

energía tiene una inclinación descendente en la dirección de flujo (Q) siempre y cuando este flujo no obtenga una energía adicional como por ejemplo el de una bomba.

Figura 2.1: Representación gráfica de energía en una tubería



Fuente: "Hidráulica general". Gilberto Sotelo Ávila. (1997)

La ecuación general de la conservación de la energía entre las dos secciones, 1 y 2 del eje de conducción, es de la forma siguiente:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_r + \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial(\beta V)}{\partial t} ds \quad (1)$$

Dónde: z es la carga de posición y es medido desde el plano horizontal de referencia, $\frac{p}{\gamma}$ es la carga de presión sobre un punto cualquiera de la línea o eje de conducción, $\frac{V^2}{2g}$ es la carga de velocidad sobre un punto cualquiera de la línea o eje de conducción, $\sum_1^2 h_r$ es la pérdida de

carga total (suma de pérdidas locales y por fricción), α y β son coeficiente de *Coriolis* y de *Boussinesq*, $\frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial(\beta V)}{\partial t}$ representa la carga correspondiente al cambio local de la velocidad.

Para el caso de estudio en particular se tiene ciertas consideraciones para la aplicación de la ecuación de energía, esto es:

- El análisis del sistema de las redes del sistema de protección contra incendio se va a considerar como un flujo permanente, es decir cuando $\frac{\partial(\beta V)}{\partial t} = 0$.
- El coeficiente de *Coriolis* será igual a la unidad, es decir $\alpha = 1$.

De acuerdo a las consideraciones definidas, la ecuación de energía quedaría de la siguiente forma:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_r \quad (2)$$

2.2.2 Pérdidas de energía por fricción

La pérdida de energía generada por la fricción entre las paredes de la tubería y el flujo puede ser determinada mediante las fórmulas de Hazen-Williams:

$$h_f = \omega \frac{L}{C^m D^n} Q^m \quad (3)$$

Dónde; para unidades internacionales:

h_f : Representa la perdida de energía por fricción

ω : Factor de conversión de unidades (para el sistema SI $\omega=10.6744$)

L : Longitud de tubería en metros

C: Coeficiente de rugosidad de Hazen –Williams, adimensional y depende del material.

D: Diámetro interno de la tubería expresado en metros

Q: Flujo de agua expresado en (m³/s) que circula por la tubería

m: Exponente del caudal y del coeficiente de H-W, $m = 1.852$

n: Exponente de diámetro, $n = 4.871$

Asimismo, para unidades inglesas:

ω: Factor de conversión de unidades ($\omega=4.52$)

L: Longitud de tubería en pies (ft)

D: Diámetro interno de la tubería expresado en pulgadas (in)

Q: Flujo de agua expresado en (gpm) que circula por la tubería

m: Exponente del caudal y del coeficiente de H-W, $m = 1.852$

n: Exponente de diámetro, $n = 4.871$

Por otro lado, es importante resaltar que para el caso de la presente tesis, la *National Fire Protection Association* (con sus siglas en inglés NFPA, 13) recomienda que para el análisis hidráulico de los sistemas de rociadores y agua pulverizada se use la ecuación de Hazen-Williams, es por ello que en adelante se considerará esta fórmula para determinar la perdida por fricción en las tuberías.

Figura 2.2: Coeficientes de Hazen-Williams

Pipe	Hazen-Williams C Factor	ϵ -Factor (in.)
Steel (new)	143	0.0018
Steel	120	0.004
Steel	100	0.015
Copper	150	0.000084
Plastic	150	0.000084

Fuente: “Stándar for the Installation of Sprinklers Systems”. NFPA (2013)

2.2.3 Pérdidas locales

Esta pérdida se produce en un determinado punto local de la tubería, en ella puede darse un cambio de dirección (usualmente se usa codos, Tés), puntos de control (válvulas, compuertas, etc.), puntos de entrada y salida de flujo, ampliaciones y reducciones. La fórmula que gobierna el comportamiento de dicha perdida local o singular es como sigue:

$$h_{local} = K_a \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Donde: h_{local} es la pérdida de energía local en metros, K_a es el coeficiente de perdidas menores adimensional, $V^2/2g$ representa la carga de velocidad, aguas abajo, de la zona de alteración del flujo en metros. Se presentan los valores comunes del coeficiente K_a de acuerdo al tipo de accesorio (ver figura 2.3).

Figura 2.3: Coeficientes de pérdidas locales

ACCESORIO	COEF. PÉRDIDAS
Válvula de Globo, todo abierta	10.0
Válvula de Ángulo, todo abierta	5.0
Válv. Retenc. Clapeta, todo abierta	2.5
Válvula Compuerta, todo abierta	0.2
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio mediano	0.8
Codo de radio grande	0.6
Codo a 45°	0.4
Codo de retorno (180°)	2.2
Té Estándar – flujo recto	0.6
Té Estándar – flujo desviado	1.8
ACCESORIO	COEF. PÉRDIDAS
Entrada brusca	0.5
Salida brusca	1.0

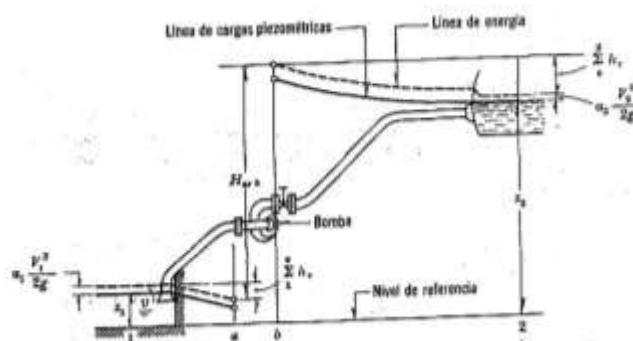
Fuente: “Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas”. García (2006)

2.2.4 Ecuaciones de energía en un sistema de bombeo

Para el caso de un sistema de bombeo, el flujo adquiere energía proporcionada por la bomba para ir del punto 1 al punto 2, esta energía se define como $H_{a,b}$ (ver figura 2.4), la misma que será añadida a la ecuación 2, quedando así la siguiente expresión:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_{a,b} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_r \quad (5)$$

Figura 2.4: Sistema de bombeo



Fuente: “Hidráulica general”. Gilberto Sotelo Ávila. (1997)

2.2.5 Ecuación de descarga en orificios

Para estimar el flujo de descarga a través de un orificio de pequeñas dimensiones se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = C_v C_o A \sqrt{2gH} \quad (6)$$

Donde; C_v es el coeficiente de velocidad (adimensional), C_o es el coeficiente de contracción (adimensional), área del orificio(A).

2.2.6 Ecuación de emisores

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo de agua a través de los emisores, se define un coeficiente de descarga (C_d) igual al producto de C_o por C_v . Entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (7)$$

Considérese lo siguiente:

- Para un orificio circular, entonces $A = \pi(D^2/4)$
- El desnivel puede expresarse como $H = P/\gamma$; donde P es la presión, γ es el peso específico del agua.

Se tiene una nueva forma de expresar la ecuación 7:

$$Q = 29.84 C_d D^2 \sqrt{P} \quad (8)$$

Donde:

Q : Caudal en gpm

P : Presión en psi

D : Diámetro interno del orificio en pulgadas (in)

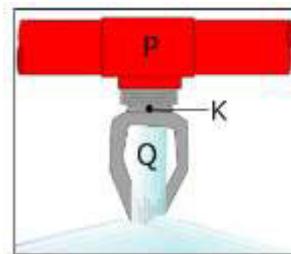
C_d : Coeficiente de descarga sin dimensiones

Además, si se reduce el término $29.84C_dD^2$ a una constante K ; la ecuación de emisores representada de la forma siguiente:

$$Q = K\sqrt{P} \quad (9)$$

Donde K ($gpm/\psi^{0.5}$) es el coeficiente de descarga característico de cada emisor, ya sea para un rociador (ver figura 2.5), hidrante, monitor, aspersores u otros.

Figura 2.5: Descarga de agua a través de un Rociador



Fuente: <http://www.contraincendio.com.ve/factor-k-de-rociadores/>

2.3 Sistema de tuberías a presión

Un sistema de redes de tuberías puede definirse según el CONAGUA (s.f) como:

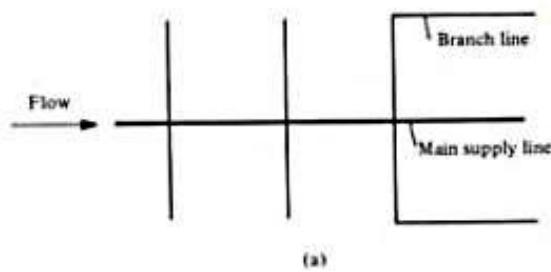
“Una red de distribución (que en lo sucesivo se denominará red) es el conjunto de tubos, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma domiciliaria o hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como extinguir incendios” (pag.1). Entonces, el sistema debe proporcionar

presiones adecuadas para su correcto funcionamiento. Los sistemas de tuberías a presión pueden ser clasificados como:

a. Sistema de tuberías bifurcadas:

Según a la forma de su funcionamiento este tipo de sistemas bifurcadas o abiertas están conformadas por tuberías con forma ramificada a partir de una tubería principal (ver figura 2.6) o también denominado matriz principal.

Figura 2.6: Sistemas de tuberías abiertas

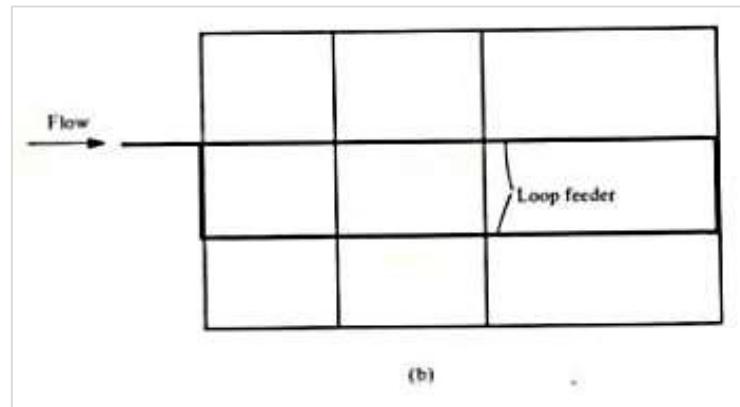


Fuente: <http://faculty.kfupm.edu.sa/>

b. Sistema de tuberías malladas:

Según su funcionamiento este tipo de sistemas malladas o cerradas están conformadas por tuberías con forma de circuitos cerrados (ver figura 2.7) con el fin de que en cualquier zona pueda ser distribuida el agua simultáneamente por más de una tubería, incrementando la confiabilidad del abastecimiento.

Figura 2.7: Sistemas de tuberías cerradas

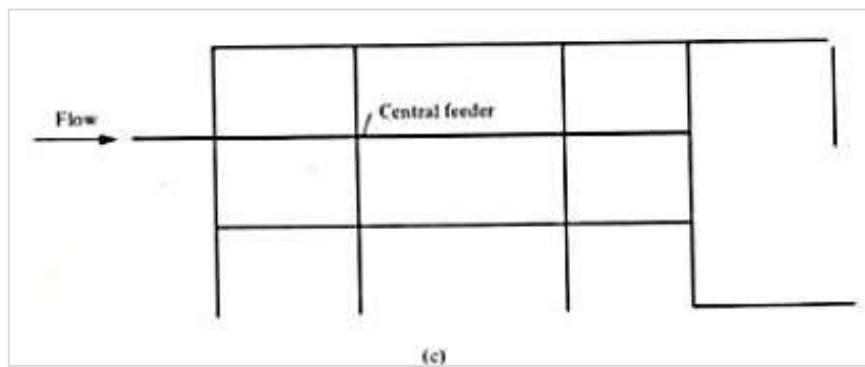


Fuente: <http://faculty.kfupm.edu.sa/>

c. Sistema de tuberías mixtas :

Se define como el resultado de la combinación de redes de tuberías malladas y ramificadas (ver figura 2.8), este tipo de sistemas es ampliamente utilizado.

Figura 2.8: Sistemas de tuberías mixtas



Fuente: <http://faculty.kfupm.edu.sa/>

2.4 Métodos para el análisis de sistemas de tuberías

El análisis del flujo de agua en un sistema de tuberías implica escribir la ecuación de continuidad para cada nodo en el sistema y la ecuación de energía para cada tubería. Sin

embargo para sistemas reales, se pueden generar miles de ecuaciones, además las ecuaciones de energía no son lineales en términos del flujo y carga, por lo que no se pueden resolver directamente. Frente a ello, se deben emplear algunas técnicas numéricas potentes que permitan resolver ecuaciones no lineales. Para la solución de problemas de equilibrio en régimen estático o permanente, existen diversos métodos como las que serán explicados a continuación de una manera resumida.

2.4.1 Método de Hardy Cross

Este es el método más antiguo para el análisis de redes de tuberías elaborado por Hardy Cross (1936), es un método basado en iteraciones sucesivas para determinar el flujo de fluido que circula por el sistema de redes de tuberías conociendo los flujos de entrada y salida. El método de Hardy Cross puede resumirse a los siguientes pasos:

1. Haga una estimación inicial del caudal en cada tubería de tal manera que todas las ecuaciones de continuidad de unión sean satisfechos.
2. Calcule la suma de pérdidas de carga alrededor de un circuito de la red conservando un registro de signos. Si la dirección de movimiento (en sentido horario o anti horario) alrededor del circuito es opuesto a la dirección del flujo en la tubería la pérdida de carga (h_f) es negativo. Este paso determina el numerador de la ecuación (10)

$$\Delta Q = -\frac{\sum(K)_i Q_i^{n_i}}{\sum|n_i(K)_i Q_i^{n_{i-1}}|} \quad (10)$$

3. Calcular el denominador de la ecuación (10) acumulando estos valores absolutos alrededor del mismo circuito.
4. Calcular ΔQ dividiendo el resultado del paso 2 con el resultado del paso 3

5. Repita los pasos del 2 al 4 para cada circuito de la red
6. Repita los paso del 2 al 5 iterativamente hasta que todos los ΔQ estimados durante una iteración sea lo suficiente pequeño para ser insignificante o en lo posible que este valor sea cero.

2.4.2 Método del gradiente hidráulico:

Este método puede clasificarse como un método híbrido de nudos y mallas. Pilati y Todini (1984), demostraron matemáticamente que las condiciones necesarias para el flujo constante en las redes de suministro de agua son el cumplimiento simultaneo del equilibrio nodal y la relación no lineal entre la perdida de carga y el flujo para cada tubería. Un modelo general para describir el comportamiento no lineal del flujo de la tubería es de la siguiente manera:

$$h_{ij} = H_i - H_j = R_{ij} Q_{ij}^n \quad (11)$$

Dónde:

h_{ij} : Pérdida de carga entre los nodos de unión de la tubería "i" y "j".

NP: Número total de tuberías en la red.

H_i : Cabeza piezométrica nodal.

R_{ij} : Resistencia de los nodos de unión de la tubería "i" y "j".

Q_{ij} : Flujo en tubos que unen nodos "i" y "j".

n : Exponente de flujo, dependiendo no sólo de la fórmula que se utiliza, sino también del régimen hidráulico en el que la tubería está operando, ya sea laminar o turbulento.

La ecuación (11) también permite representar las perdidas menores debido a los accesorios como curvas, reducciones, uniones, válvulas, entre otros, con la condición de que

los valores de " R_{ij} " y " n " sean conocidos. Para el caso de la inclusión de bombas, esta se logra adoptando el siguiente modelo matemático general:

$$h_{ij} = \alpha_{ij} Q_{ij}^n + \beta_{ij} \quad (12)$$

Donde los parámetros:

α_{ij} , β_{ij} y " n " deben determinarse a partir de datos sobre el rendimiento real de la bomba.

Luego, usando el enlace a las matrices topológicas del nodo No-fuente y nodo fuente (A_{12} y A_{10} respectivamente), se puede escribir la pérdida de carga (o “ganancia” de altura en el caso de las bombas) de cada enlace conectando dos nodos diferentes como:

$$A_{11}Q + A_{12}H = -A_{10}H_0 \quad (13)$$

Donde;

H : Es el vector de columna ((NN-NS) x 1) de alturas desconocidas.

H_0 : Es el vector de columna (NSx1) de alturas piezométrica (reservorios) fijas.

Con la ecuación 12, la matriz A_{11} puede ser definido mediante la siguiente forma matemáticamente:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \alpha_1 |Q_1|^{n_1-1} + \frac{\beta_1}{Q_1} \\ \alpha_2 |Q_2|^{n_2-1} + \frac{\beta_2}{Q_2} \\ \alpha_3 |Q_3|^{n_3-1} + \frac{\beta_3}{Q_3} \\ . \\ . \\ \alpha_{NP} |Q_{NP}|^{n_{NP}-1} + \frac{\beta_{NP}}{Q_{NP}} \end{bmatrix}$$

Para conseguir los caudales y alturas piezométricas mediante este método se aplica un procedimiento iterativo, al definir:

$$Q^{(i+1)} = (I - G^{-1}A_{11})Q^{(i)} - G^{-1}(A_{12}H^{(i+1)} + A_{10}H_O) \quad (14)$$

Donde:

$$G = N(A_{11}^*)$$

$$A_{11}^* = \begin{bmatrix} \alpha_1|Q_1|^{n_1-1} & & & \\ & \alpha_2|Q_2|^{n_2-1} & & \\ & & \alpha_3|Q_3|^{n_3-1} & \\ & & & \ddots \\ & & & & \alpha_{NP}|Q_{NP}|^{n_{NP}-1} \end{bmatrix}$$

$$= A_{11} - \begin{bmatrix} \frac{\beta_1}{Q_1} & & & \\ & \frac{\beta_2}{Q_2} & & \\ & & \frac{\beta_3}{Q_3} & \\ & & & \ddots \\ & & & & \frac{\beta_{NP}}{Q_{NP}} \end{bmatrix}$$

$N = (NP \times NP)$ matriz diagonal de los exponentes "n" de la relación pérdida de carga y flujo.

G^{-1} : Es la inversión de la matriz G(es una matriz diagonal).

Y donde $A_{12}(i,j)$ y $A_{10}(i,j)$ según Todini (1979) y Pilati (1987), estas representan las matrices topológicas para describir la conectividad rama-nodo y rama-circuito definiéndose de la siguiente manera:

$$[A_{12}(i,j)]_{NPx(NN-NS)} = \begin{cases} 1, & \text{si la tubería } i \text{ termina en el nodo } j \\ -1, & \text{si la tubería } i \text{ comienza en el nodo } j \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$$

NP: Es el número de ramas, NN el número de nodos y NS el número de nodos fuente. Así NN-NS representa el número de nodos de alturas piezométricas desconocidos.

La matriz de incidencia rama-a-nodo para los nodos fuente $A_{10}(i,j)$, es una matriz (NPxNS), de características similares a la matriz $A_{12}(i,j)$:

$$A_{10}(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{si la tubería } i \text{ termina en el nodo } j \\ -1, & \text{si la tubería } i \text{ comienza en el nodo } j \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$$

En general, la transposición de una matriz topológica se denota por el intercambio de los subíndices en las matrices, así:

$$A_{21} = {A_{12}}^T$$

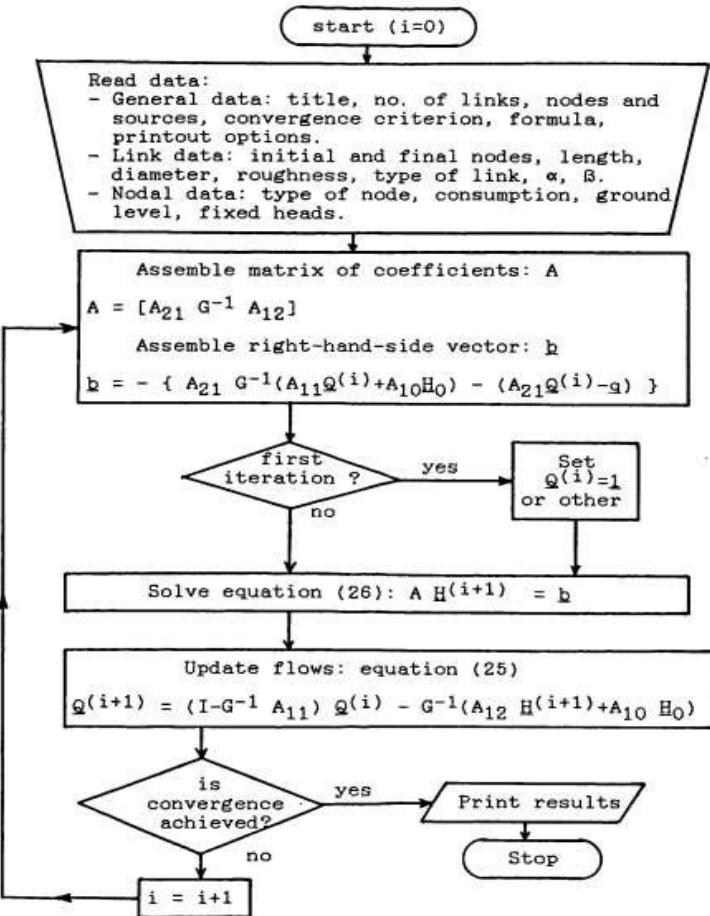
$$A_{01} = {A_{10}}^T$$

La ecuación (2.18) representa un sistema lineal de ecuaciones (NN-NS) en las alturas piezométricas desconocidas, como se muestra a continuación:

$$(A_{21}G^{-1}A_{12})H^{(i+1)} = -\left(A_{21}G^{-1}(A_{11}Q^{(i)} + A_{10}H_0) - (A_{21}Q^{(i)} - q)\right) \quad (2.18)$$

La Figura 2.9 representa gráficamente los pasos principales del algoritmo numérico del método de gradiente.

Figura 2.9: Diagrama de flujo de los pasos principales en el método de gradiente.



Fuente: “Modelado por computadora de redes de distribución de suministro de agua utilizando el método de gradiente”. Salgado (1988)

2.5 Software WaterCAD para el diseño de redes de agua a presión

a. Generalidades

Es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes de tuberías a presión desarrollado inicialmente por la Empresa Haestad Methods con

base en la ciudad de Watertown en el estado estadounidense de Massachusetts y lanzado al mercado a inicios del año 1990 con el nombre comercial de CyberNet, ya para el año 2000 este nombre cambio a WaterCAD, el mismo que empezó a tener mejoras en la interfaz gráfica y herramientas de entrada (input) de datos. Además, con el objetivo de mejorar la velocidad de convergencia y uso de almacenamiento computacional adaptaron el método de gradiente conjugado para realizar el análisis hidráulico. Ya para el año 2004 esta empresa fue adquirida por Bentley Systems y la que tiene el dominio hasta la actualidad.

b. Características principales

- El análisis hidráulico de redes de agua se basa en el método del Gradiente Hidráulico permitiendo determinar; las presiones en distintos puntos del sistema, caudales, velocidad, perdidas de carga, parámetros operativos de bombas, válvulas, tanques entre otros a partir de las características físicas del sistema y condiciones de demanda previamente establecidas.
- Cuenta con una plataforma o interfaz gráfica para cada usuario, amigable y puede trabajarse de manera integrada con el software AutoCAD y con sistemas SCADA.
- Extracción inteligente de datos desde GIS u otras fuentes de información para la construcción de modelos hidráulicos.
- Generación ágil y comparación de escenarios de operación para obtener una mejor gestión de modelos.

- Generación de reportes gráficos y tabulares para el análisis e interpretación de los resultados.

c. Utilidad

- Modelación hidráulica de redes de distribución: Permite la construcción de modelos mediante las siguientes fases; construcción topológica, información de infraestructura (longitudes y diámetros), asignación de elevaciones, estimación de demandas, simplificación o esqueletización, escenarios y alternativas, ejecuciones de simulaciones y como última fase la calibración.
- Simulación en estado permanente.
- Simulación en Periodo Extendido: Es el resultado de series de estados estáticos unidos rastreando el sistema a lo largo del tiempo; por ende, usar este componente resulta importante para el dimensionamiento de tanques (observación de nivel de agua a lo largo del tiempo), funcionamiento de bombas y válvulas, estimación de gasto de energía y estudio de calidad del agua.
- Calibración de modelos hidráulicos: Comparar los valores observados versus los modelados, realizar ajustes de tal forma que el modelo reproduzca de la mejor forma real y la certeza en el modelo como una herramienta de decisión permite generar un ahorro óptimo de inversión.
- Modelación de calidad de agua: Basado en un análisis de periodo extendido con tres tipos de modelación; edad del agua, rastreo de fuente y constituyente.
- Análisis de elementos críticos: Es importante conocer las válvulas de aislamiento y cuál debe ser su operación conjunta para aislar tramos en el

sistema, existe una necesidad de encontrar los elementos críticos(mayor impacto) sin embargo, esta tarea no puede hacerse simplemente removiendo líneas de tuberías debido a que el manejo de cortes reales depende de la operación de válvulas.

- Análisis de protección contra incendio: Basado en un análisis del tipo estático para analizar la capacidad de respuesta de la red ante un evento de incendio.
- Análisis de costos de energía: determinación de la energía consumida y costos en las estaciones de bombeo.
- Análisis y proyecciones de roturas de tuberías.
- Análisis de lavado de tuberías por estrategias de vaciado.

d. Limitaciones

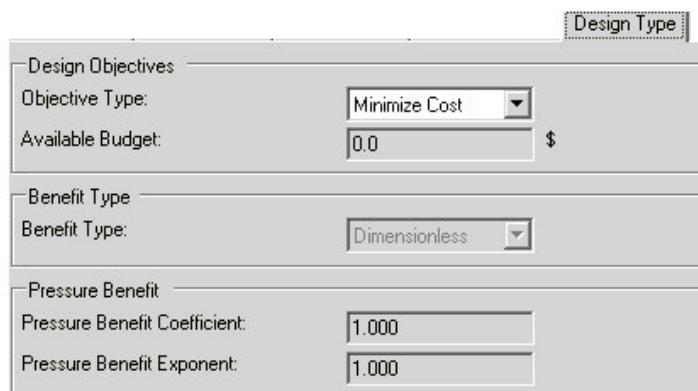
Una de las limitaciones principales del software es que: “WaterCAD no tiene la capacidad de tener una única herramienta capaz de ofrecer soporte para cuatro plataformas como AutoCAD, ArcGIS y MicroStation, adicional a una plataforma Stand Alone con toda la funcionalidad ” (Quintero,2012,p.4). Esto es una de las desventajas que presenta el software al funcionar como una plataforma autónoma. Asimismo, otra de las limitaciones es que el programa a un no es capaz de realizar análisis y diseños de sistemas de alcantarillado sanitarios urbanos.

2.6 Módulo Darwin Designer

Darwin Designer es una herramienta novedosa que tiene el software WaterCAD en la versión V8i, este módulo que usa la teoría de Algoritmos Genético (AG) para encontrar a

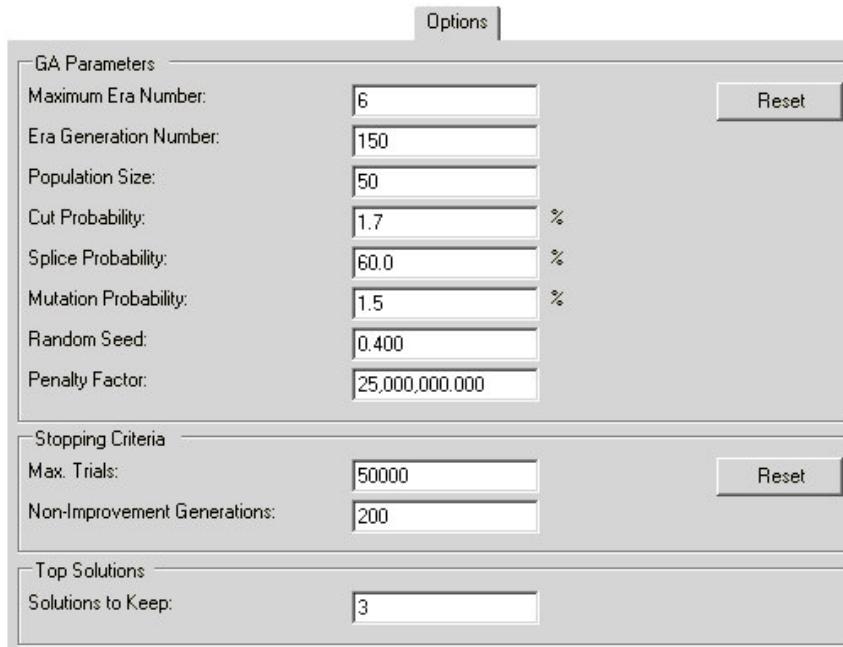
través de una ejecución automatizada el conjunto de diámetros de una red de tuberías que minimice el costo (ver figura 2.10) de inversión y cumpla con los requerimientos de presión, es decir permite encontrar la solución óptima para la red bajo criterios de desempeño y disponibilidad de dinero.

Figura 2.10: Objetivo del tipo Minimizar el costo



Para la ejecución automatizada, los manuales software recomiendan que los valores de los distintos parámetros((Ver figura 2.11)) del Algoritmo Genético(AG) como; número máximo de Era (6), Era generación número (150), tamaño de población (50), probabilidad de corte (1.7%), probabilidad de cruce (60%) y probabilidad de mutación (1.5%), se mantengan por defecto a excepción de semilla aleatoria (0.40) y factor de penalización (25000000000) que puede ser modificado por el usuario

Figura 2.11: Parámetros de Algoritmo Genético (AG)



Por otro lado, los parámetros que corresponden al criterio de parada (Stopping Criteria) son:

- Max. Trial (Máximas pruebas): En ella se puede establecer el número máximo de pruebas de calibración que deseé que el Algoritmo Genético (GA) procese antes de detenerse.
- Non-Improvement Generations(Generaciones sin mejoras): En ella se puede establecer la cantidad máxima de generaciones sin mejoras que desea que los Algoritmos Genéticos(GA) procese sin calcular una condición física mejorada. Si los GA realiza este número de cálculos sin encontrar una mejora que sea mejor que la tolerancia de aptitud definida, la GA se detendrá. Las Generación no mejoradas trabajan en conjunto con Fitness Tolerance.

Asimismo, el parámetro que corresponde al Top Solutions (Top de soluciones), es:

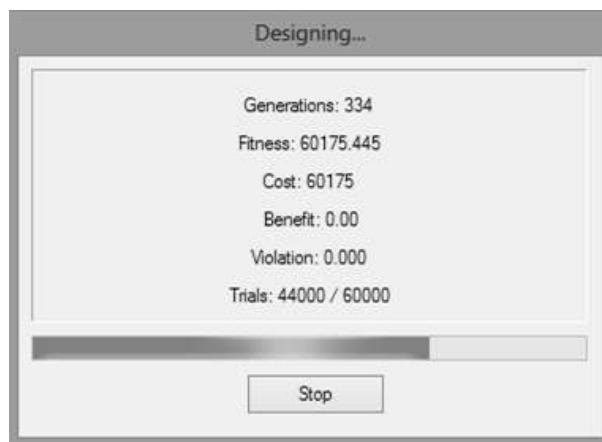
- Solutions to keep(Mejores soluciones para conservar): En ella se puede ingresar la cantidad de soluciones que se desea conservar. Para un tipo de

diseño de minimizar costos o maximizar beneficio, Darwin Designer conserva las mejores soluciones posibles de acuerdo con el valor de la función objetivo.

Si la cantidad de soluciones principales especificada por el usuario es mayor que la cantidad de soluciones factibles encontradas, Darwin designer informa todas las soluciones factibles encontradas.

Finalmente, como parte del proceso de análisis automatizada, el modelo evaluará diferentes tamaños de tubería que se encuentran dentro de las restricciones ingresadas hasta que se encuentre la mejor solución según el tipo de objetivo (mínimo costo). Luego, continuará hasta que encuentre la mejor solución disponible, esto puede verse a través del cuadro de dialogo denominado progreso de ejecuciones (ver figura 2.12) con la siguiente información:

Figura 2.12: Progreso de ejecuciones



Donde:

- Generations(Generaciones): El valor máximo para las generaciones está determinado por el número de Era Máximo y el Numero de Generación de Era que se establecieron en la figura(2.11), sin embargo el número real de

generaciones que se determinan depende de los valores ingresados en la opción de Stopping Criteria(criterio de parada).

- Fitness (estado físico o aptitud): En este caso, estaba calculando según el costo. Por lo tanto, la mejor forma física o aptitud es la solución menos costosa que encontró el Algoritmo Genético (GA).
- Cost(costo): El costo más bajo encontrado por el cálculo se muestra aquí.
- Benefit(Beneficio): Mejora de la presión medida en la red de tuberías. Esto es “0” porque la lección solo considera el costo y no el beneficio de la presión.
- Violation (Violación): Aquí se muestra la violación más grande de los límites de presión y flujo establecidos, como las presiones máximas o mínimas, para garantizar las soluciones correctas este valor tiene que llegar a ser cero.
- Trials (pruebas): El valor máximo para las pruebas está determinado por lo que se establecido en la opción Stopping Criteria(criterio de parada). Ademas se puede establecer un número mayor al producto de (Numero de Era Máximo)*(Número de generaciones de Era)*(Tamaño de población), pero los cálculos más allá de ese número (para este ejemplo, el valor de 45,000) tienen menos probabilidad de producir mejoras significativas.

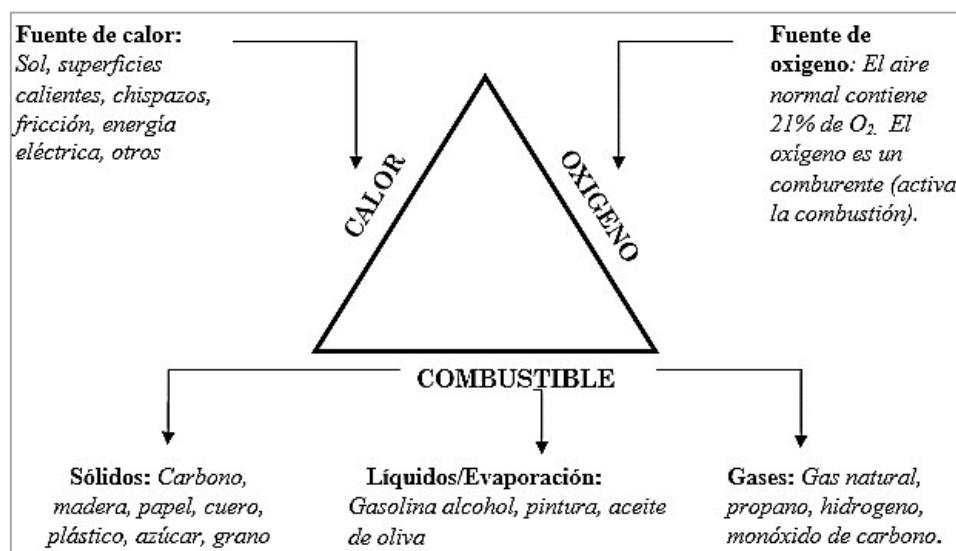
2.7 Teoría de incendios

En términos simples, el fuego se define como una forma de reacción química que impide la rápida oxidación del combustible (material) con la subsiguiente liberación de calor y luz indicada por incandescencia o llama. Sin embargo cuando el fuego es lo suficientemente grande de manera que sea descontrolada a lo largo del tiempo y espacio se la define como incendio.

2.7.1 Triángulo de fuego

Para que ocurra el fuego, los siguientes elementos (ver figura 2.13) son esenciales: Oxidante para mantener la combustión, calor para alcanzar la temperatura de ignición y el combustible o material combustible. Esto da como resultado una reacción química en cadena que inicia un incendio. Sin embargo, al eliminar cuáquera de estos elementos se extinguirá el fuego.

Figura 2.13: Triángulo de fuego



2.7.2 Tipos de fuego

Sobre la base del tipo de combustible que se está quemando, los incendios son clasificados de la siguiente manera:

- **Clase A:** Estos fuegos son alimentados por materiales combustibles ordinarios, como madera, tela, papel, cartón y muchos plásticos. Este tipo de fuego deja cenizas y es mejor combatir quitando el lado del calor del triángulo.
- **Clase B:** Estos fuegos son alimentados por líquidos inflamables, líquidos combustibles, grasas de petróleo, alquitranes, aceites, pintura a base de aceite, solventes, lacas, alcoholes y gases inflamables. Este tipo de fuego se quema en superficie de los combustibles y se extingue mejor con una acción de cobertura o asfixia.
- **Clase C:** Estos fuegos se producen en equipos eléctricos energizados, donde la no conductividad eléctrica de los medios de extinción es importante. Cubrir o sofocar este tipo de fuego con un agente extintor no conductor es de primordial importancia. Nunca deben usarse agua o soluciones que contienen agua en un incendio de esta clase.
- **Clase D:** Estos fuegos son alimentados por metales combustibles, como magnesio, titanio, sodio, litio y potasio.
- **Clase K:** Estos fuegos se producen en aparatos de cocina que intervienen medios de cocción combustibles como; aceites vegetales, aceites animales o grasa que generalmente se encuentran en las cocinas comerciales, incluidos las que se encuentran en restaurantes y cafeterías.

2.7.3 Tipos de propagación del fuego

- **Conducción:** Se define como el mecanismo de transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas como resultado de interacciones entre las partículas.
- **Convección:** Se le denomina así al modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, e implica la combinación de efectos de conducción y movimiento de fluidos. Cuanto más rápido sea el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.
- **Radiación:** Es un proceso en el cual viajan partículas energéticas u ondas energéticas a través del vacío, o a través de medio que contiene materia que no son necesarios para su propagación.

2.7.4 Teoría de la extinción del fuego

Está basada en la eliminación de cualquiera de los tres elementos principales del fuego.

- a. **Método de extinción por enfriamiento.** Es uno de los métodos más económicos que consiste en enfriar el combustible hasta que su temperatura esté por debajo del punto de ignición, logando así eliminar o aislar el calor. Esto se logra por ejemplo aplicando o lanzando agua sobre las superficies caliente.

- b. Método de extinción por aislamiento.** Este método consiste en la retirar o remover la fuente de combustible gaseosos o líquido. Esto se puede lograr por ejemplo cerrando la llave para evitar el flujo de gas por la tubería que se incendia.
- c. Método de extinción por sofocación.** Este método consiste en quitar o disminuir la concentración de oxígeno del ambiente que rodea el material o combustible, logrando así combatir el fuego. Los agentes extintores más comunes y eficientes para este método es el uso del Polvo Químico seco y el Dióxido de Carbono (CO₂), ya que estas al vaporizarse, remueve el oxígeno (O₂) del aire.
- d. Método de extinción por inhibición.** Este método consiste en romper la reacción en cadena. Los agentes extintores que puede lograr tal fin son por ejemplo; el polvo químico seco y el halón.

2.7.5 Restricciones en la aplicación de los distintos métodos

En general, los métodos de extinción mencionados no son del todo excluyentes, es decir, pueden combinarse dependiendo de la clase de fuego y del agente extintor que se utilice. La literatura indica que para fuegos de clase A, se puede aplicar los agentes extintores como el agua, espuma, polvo seco y dióxido de carbono, siendo el agua el más efectivo. Para fuegos de clase B, se pueden aplicar el agente extintor agua, espuma, polvo seco y dióxido de carbono, siendo el polvo seco el más efectivo. Para los fuegos de clase C y D, la mayoría de los especialistas indican que se puede extinguir mediante polvo seco y que los demás agentes son pocos efectivos. Para los fuegos de clase A, B, C y D en presencia de energía eléctrica, no se recomienda el uso del agua ni espuma por tener baja efectividad,

entonces, para este tipo de fuegos se recomienda la extinción con Polvo seco y dióxido de carbono, siendo este último el más efectivo.

2.8 Normatividad

Para la determinación de condiciones iniciales, así como restricciones de los parámetros de operación como presión, caudal, recomendaciones y otros aspectos ingenieriles relacionados con sistemas de protección contra incendios se considera el uso de las siguientes normativas y estándares tanto nacionales como internacionales, así como también debe estar sujeto a los estándares de Oiltanking, entidad que opera el terminal Juliaca.

- Ley N° 26221 Ley Orgánica que Norma las Actividades de Hidrocarburos : en el Territorio Nacional.

- D.S.052-93- Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de EM : Hidrocarburos.
- D.S.043- Reglamento de Seguridad para las Actividades de 2007-EM : Hidrocarburos.
- D.S.039- Reglamento para la Protección Ambiental en las 2014-EM: Actividades de Hidrocarburos.
- NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam.
- NFPA 13: Standard for the installation of Sprinkler Systems
- NFPA 14: Standard for the Installation of Standpipe, Private Hydrant,

and Hose Systems.

- NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection. Edition 2012.
- NFPA 20: Standard for the Installation of Stationary Pumps of Fire Protection.
- NFPA 22: Standard for Water Tanks for Private Fire Protection.
- NFPA 24: Standard for the Installation of Private Fire Service Mains and Their Appurtenances.
- NFPA 30: Code for Flammable and Combustible Liquids.
- BS-001-1: Fixed Roof Tanks – Building Specifications.
- BS-001-2: Floating Roof Tanks.
- BS-002 : Pipelines - Bulding Specifications.

CAPITULO III. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

3.1 Identificación y definición de variables

- **Variable 1: Análisis hidráulico y diseño óptimo**

Comprende la evaluación del caudal de agua y espuma que es descargado a través de los distintos dispositivos físicos (rociadores, monitores, hidrantes, cámaras o generados de espuma) y la presión a la que estos están sometidos, buscando una adecuación combinación diámetros de tuberías comerciales, la que conlleva a un costo mínimo de sistemas de redes de tuberías contra incendio.

- **Variables 2: Sistemas de protección contra incendio**

Comprenden los distintos métodos para mitigar riesgos de incendio en los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, considerando los distintos coeficientes de descarga característico de rociadores, monitores hidrantes, cámaras y generados de espuma.

3.2 Hipótesis

El análisis y diseño hidráulico optimizado de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos mediante el software WaterCAD, se logra mitigar riesgos de incendio en la planta de combustible Terminal Juliaca.

CAPITULO IV: MARCO METODOLÓGICO

4.1 Tipo de investigación

Según su finalidad, esta investigación es de tipo aplicada, debido a que el presente estudio utiliza conocimientos en la práctica, para aplicarlos en beneficio de la planta Terminal Juliaca.

4.2 Nivel de investigación

Arias (2012) afirma: “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimiento se refiere” (p.24). De acuerdo a la definición citada, esta investigación tiene un nivel descriptivo.

4.3 Diseño de la investigación

Palella y Martins (2010) afirman: “El diseño no experimental es el que se realiza sin manipular en forma deliberada ninguna variable. El investigador no sustituye intencionalmente las variables independientes. Se observa los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto en este diseño no se construye una situación específica sino que se observa las que existen” (p.87). Considerando la definición anterior, esta investigación es de tipo no experimental.

4.4 Población y muestra

Para la investigación se define como población a los distintos escenarios de incendio en los tanques de almacenamiento de Hidrocarburos líquidos. La muestra está conformada

por diez escenarios de incendio obtenidos del estudio de riesgos del Terminal Juliaca para el análisis hidráulico.

CAPÍTULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se establecen las acciones que se realizarán como parte de la solución al problema, que radica básicamente en la manera de efectuar el análisis y el diseño hidráulico optimizado de un sistema de protección contra incendio por enfriamiento y sofocación para los tanques verticales de almacenamiento de hidrocarburos líquidos de la planta terminal Juliaca. Cabe señalar que la optimización desde un punto de vista hidráulico y económico se traduce en determinar los diámetros de cada tubería que garanticen el correcto funcionamiento hidráulico y a la vez que represente el costo mínimo de instalación del sistema de protección contra incendio. Basado en lo anterior, se menciona detalladamente los pasos a seguir para la estimación de los diámetros óptimos del siguiente modo:

- Se recopila toda la información necesaria de la planta terminal Juliaca, como la ubicación, la descripción de las áreas de procesos, el sistema de almacenamiento de combustible, el sistemas de despacho de combustible, las vías de circulación interna y externa, así como las condiciones climatológicas del sitio.
- Se determina los parámetros iniciales de caudales teóricos y presiones mínimas del sistema de espuma en los tanques que almacenan hidrocarburos líquidos. Del mismo modo, para el sistema de enfriamiento se determinan los caudales teóricos y presiones mínimas requeridos en el rociador más desfavorable.
- Se realiza el análisis e interpretación de los escenarios probables de incendio de acuerdo al estudio de riesgos del terminal Juliaca que se deben tener en cuenta para el análisis hidráulico.
- Se construye un modelo matemático detallado de la red del SPCI en WaterCAD.

- Se establece el orden de análisis para la optimización de las tuberías basado en el escenario de mayor a menor requerimiento teórico agua.
- Finalmente, se realiza la estimación de los diámetros óptimos en cada escenario de incendio propuesto a través del módulo *Darwin designer (WaterCAD)*

5.1 Información base del Terminal Juliaca

a. Ubicación

Geopolíticamente, el Terminal Juliaca se ubica en la Urbanización Taparachi, distrito de Juliaca, provincia de San Román, Región Puno. Geográficamente, se ubica en las coordenadas UTM; Este 380 057 m y Norte 8 283 590 m. En relación al entorno socio económico y poblaciones cercanas, el Terminal Juliaca colinda con las siguientes áreas: Por el norte se ubica la compañía Alicorp y terrenos de terceros, por el sur se ubica terreno baldío (propiedad de terceros), por el oeste se ubica la autopista Choque Huanca y por el este se encuentra ubicado un terreno baldío. Además, el Terminal Juliaca tiene accesos vía terrestre: carretera de Cusco a Puno que atraviesa la ciudad Juliaca, vía aérea en el cual llegan vuelos diarios desde las principales ciudades del país, asimismo se encuentra comunicada por el Ferrocarril del Sur que la conecta con las ciudades de Cusco, Puno, Arequipa y Mollendo. En la figura 5.1 se muestra una vista satelital del Terminal y sus alrededores.

Figura 5.1: Vista de ubicación del Terminal Juliaca

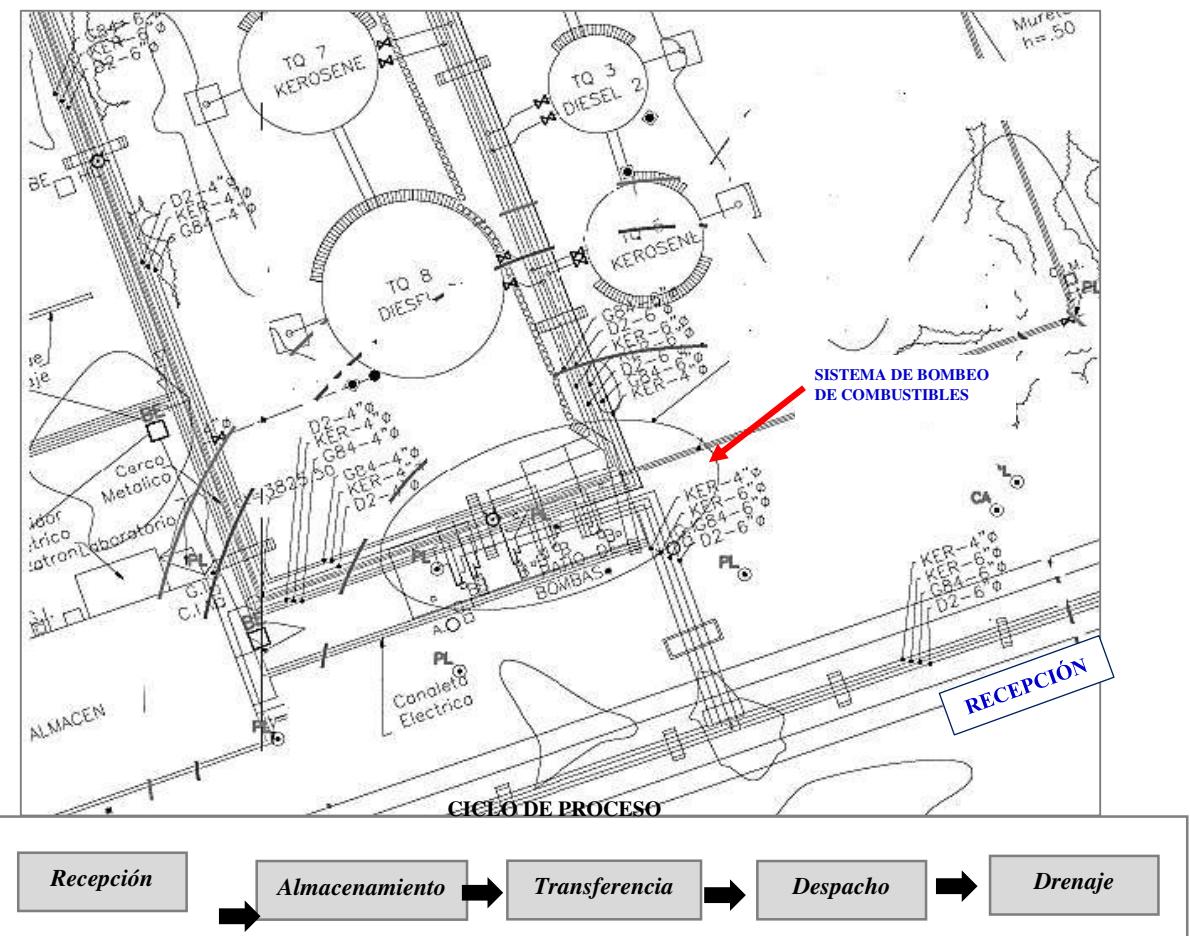


Fuente: Google Earth Pro

b. Descripción de las áreas de proceso

La descripción del área de procesos que se realiza en el Terminal Juliaca se realiza mediante sistemas de procesos, los cuales se detalla a continuación:

Figura 5.2: Sistema de tuberías de combustibles



- **Sistema de Recepción de combustible:** Las operaciones de recepción de combustible se realizan por medio de camiones cisternas y vagones tanques. La recepción de Gasolina 84 y de Alcohol Carburante se realiza normalmente desde camiones cisternas para lo cual se dispone de un punto de recepción (punto de recepción N°1) ubicado en el extremo noreste del patio de tanques. Para la operación se emplean la bombas N°5 (Gasolina 84) y la bomba N°7 (Alcohol Carburante), las cuales también tiene las facilidades para recepcionar estos productos desde vagones tanque. La recepción de Diesel B5 se realiza tanto desde camiones cisterna como de vagones tanque, estos últimos provienen desde el Terminal de Mollendo que viene siendo operado también por Consorcio Terminales. Para esta operación se emplea la bomba N°2. La recepción de Diésel B5 de camiones cisternas se realiza desde un punto de recepción (punto de recepción N°2) ubicado en el lado este del patio de tanques.
- **Sistema de Almacenamiento de combustible:** El sistema de almacenamiento del Terminal está conformado por nueve tanques verticales ubicados dentro de cubetos de contención que permite controlar un eventual derrame de combustible. En la Tabla 5.1 se muestra las características principales de los tanques de almacenamiento como; dimensiones (altura y diámetro), estado, producto, capacidad y tipo de techo de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos a proteger ante un evento de incendio.

Tabla 5.1: Descripción de tanques a proteger

Tanque	Estado	Producto	Punto de inflamación (°C)	Capacidad	Tipo de techo	Altura	Diámetro
						MB	m
TQ-1	Existente	Diésel B5	52 mínimo	3.31	Techo Fijo	9.19	8.51
TQ-5	Modificado	Etanol	13	2.60	Techo Flotante	9.22	8.06
TQ-6	Existente	Diésel B5	52 mínimo	5.03	Techo Fijo	11.06	9.58
TQ-7	Existente	Diésel B5	52 mínimo	5.02	Techo Fijo	11.62	9.61

TQ-8	Existente	Diésel B5	52 mínimo	8.29	Techo Fijo	11.00	12.32
TQ-9	Existente	Diésel B5	52 mínimo	10.23	Techo Fijo	11.25	13.82
TQ-10	Existente	Gasolina 84	< 0	11.57	Techo Flotante	14.12	14.42
TQ-11	Nuevo	Gasolina 84	< 0	15.00	Techo Flotante	13.50	16.0
TQ-30	Existente	Alcohol Carburante	7	0.62	Sabana Flotante	5.31	4.83

- **Sistema de Transferencia de Producto**

El sistema de transferencia de producto – Recepción: Conformado por un rack de tuberías aéreas: las líneas de succión y descarga de las bombas de recepción.

Las tuberías principales de transferencia de producto que vienen desde las bombas de recepción y van hacia los tanques de almacenamiento tienen 4" Φ y 6" Φ (ver figura 5.2).

El sistema de transferencia de producto – Despacho: Conformado por un rack de tuberías aéreas: las líneas de succión y descarga de las bombas de despacho. Las tuberías principales de transferencia de Gasolina 84 y Diésel B5 que llegan a las islas de despacho tienen 6" Φ (ver figura 5.2). La tubería de succión de la bomba de despacho de alcohol carburante tiene 4" Φ, mientras que la línea de descarga tiene 3" y 2" Φ.

- **Sistema de despacho de combustible:** El sistema utilizado para las operaciones de despacho está conformado por las tuberías, bombas de transferencia y de accesorios que permiten el despacho de producto desde los tanques de almacenamiento a los camiones cisterna por medio de las islas de despacho. Durante el despacho del Gasohol 84 se realiza una mezcla en línea de la Gasolina 84 con el Alcohol Carburante. Además se dispone de dos bombas para transferir el Alcohol Carburante desde su tanque de almacenamiento (Tanque TQ-30) hacia el punto de mezcla con Gasolina 84. De acuerdo al requerimiento del distribuidor mayorista se realiza la

aditivación de la Gasolina 84 y el Diésel B5, esta operación se realiza en línea durante el despacho a los camiones cisternas. Los aditivos están almacenados en tanques verticales de 1.0 m de diámetro y 2.4 m. de altura. La inyección de aditivos se realiza mediante un controlador Danload 6000, que tiene ser previamente configurado por el operador de acuerdo al requerimiento del distribuidor mayorista. Los combustibles aditivados son despachados a través de las 02 islas de despacho disponibles dentro del Terminal cada una de las cuales puede despachar sólo determinados combustibles. El sistema utilizado para las operaciones de despacho desde el nuevo tanque TQ-11 de gasolina 84 estará conformado por las tuberías proyectadas y se hará uso del sistema de despacho existente en el terminal.

- **Sistema de Drenajes:** El sistema de drenaje de producto en el Terminal está conformado por los pozos ciegos de drenaje de los tanques de almacenamiento de donde el producto de drenaje es recolectado. La zona de bombas de recepción y despacho así como las plataformas de recepción y despacho donde se estacionan los camiones cisternas, cuentan con losa de concreto, las cuales en caso de derrame evitará que el producto infiltre en el suelo.

c. Edificaciones y vías de circulación vehicular interna y externa

El Terminal está rodeado por un muro perimetral de 3.0 m de altura y cuenta con edificaciones como; oficina de mayoristas, caseta de vigilante, cuarto de subestación eléctrica- Grupo Electrógeno, oficinas Administrativas, almacenes y Talleres. Por otro lado, las vías de acceso, vías de circulación vehicular interna y externa está formado por una (01) puerta de ingreso y salida de camiones cisternas de 6.0 m de ancho cada una, una (01) puerta de ingreso peatonal de 1.0 m de ancho, Una

(01) puerta de ingreso y otra de salida del tren (vagones tanque) ubicadas al sur de la planta.

d. Condiciones climatológicas

Las condiciones climatológicas generales de la zona se muestran en la figura 5.3:

Figura 5.3: Condiciones climatológicas

Característica	Descripción	
Altitud	3,830 msnm	
Presión ambiental	0.64 bar	
Temperatura (media anual)	Minima	-2.0°C
	Máxima	20.0°C
	Promedio	11.0°C
Humedad Relativa	60 %	
Lluvias	Precipitación promedio anual fluctúa entre los 600 y 1000 mm.	
Vientos	Dirección Predominante	N
	Velocidad	2.0 m/s
Sismicidad	Zona 2 – Sistema PERU	

Fuente: Estación Juliaca-Senamhi

5.2 Criterios de combate de incendio

- a. **En los tanques de almacenamiento:** Los tanques almacenan líquidos inflamables y combustibles, bajo esta premisa se recomienda que el combate de incendio se realice por el método de sofocación mediante la aplicación de espuma de baja expansión, ya que esta posee la característica de desplazarse bien sobre las superficies líquidas, aislando el combustible del ambiente que lo rodea. Además para refrigerar las paredes y techo de los tanques que puedan verse afectados por la radiación emitida desde tanques adyacentes durante un incendio, se elige el método de combate por enfriamiento mediante sistemas de rociadores pulverizadoras y lanzadores de agua respectivamente.

- b. En Islas de recepción y despacho:** En base a las conclusiones del estudio de riesgos, el nivel de riesgo ante un evento de incendio en estas zonas es bajo, por lo que no es necesario tomar medidas correctivas, pero recomienda medidas que no supongan inversiones o gastos, por ende es suficiente el uso de los monitores e hidrantes cercanos a estas instalaciones para combatir el fuego.
- c. En cuarto de bombas:** El recinto contará con un tanque de suministro de combustible (Diésel) para el funcionamiento de la motobomba contra incendio, por lo que según la NFPA 13, esta ocupación es considerada como riesgo extra grupo 2 establecimiento el criterio de extinción por enfriamiento mediante rociadores de respuesta rápida que cumplan tanto la función de detectar y extinguir el fuego.

5.3 Sistema de sofocación en tanques

El sistema fijo de sofocación está conformado por una o más cámaras generadores de espuma (Foam Chamber) o generadores de espuma (Foam Maker) instaladas en la parte superior del casco de un tanque de líquido inflamable o combustible enlazado a un sistema de generación de espuma con una proporción de mezcla del 3% de concentrado con 97% de agua, compuesto también por líneas de tuberías para el espumante.

5.3.1 Determinación de parámetros iniciales

- a. La estimación del número de cámaras generadoras de espuma es definida por la NFPA 11 mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.2: Número de salidas de descarga de espuma en tanques

Diámetro del tanque		Número mínimo de salidas de descarga
m	pie	
Hasta 24	Hasta 80	1
Más de 24 a 36	Más de 80 a 120	2
Más de 36 a 42	Más de 120 a 140	3
Más de 42 a 48	Más de 140 a 160	4
Más de 48 a 54	Más de 160 a 180	5
Más de 54 a 60	Más de 180 a 200	6

Fuente: "Norma para espuma de baja, media y alta expansión". NFPA 11 (2010)

- b. El Rating de aplicación de solución de agua-espuma al tanque es definido por la NFPA 11 mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.3: Rate de aplicación de espuma en salidas fijas

Tipo de hidrocarburo	Tasa mínima de aplicación		Tiempo mínimo de descarga min
	LPM/m ²	GPM/pie ²	
Punto de inflamación entre 37.8° y 60°C	4.1	0.1	30
Punto de inflamación menor de 37.8°C o líquidos calentados por encima de sus puntos de inflamación	4.1	0.1	55
Petróleo crudo	4.1	0.1	55

Fuente: "Norma para espuma de baja, media y alta expansión". NFPA 11 (2010)

- c. El rating de aplicación de solución de agua-espuma al tanque por medio de generadores de espuma es definido por la NFPA 11 mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.4: Protección con descarga fija de espuma encima del sello para tanques de techo flotante (Open-Top)

Tipo de Cierre	Régimen mínimo de aplicación		Tiempo mínimo de descarga	Espacio máximo entre salidas de descarga con			
	Lpm/m²	Gpm/pie²		min	m	pie	m
Cierre de Zapata mecánica	12.2	0.3	20	12.2	40	24.4	80
Cierre de Tubo con protector metálico de intemperie	12.2	0.3	20	12.2	40	24.4	80
Sello secundario total o parcialmente combustible	12.2	0.3	20	12.2	40	24.4	80
Cierre Secundario metálico	12.2	0.3	20	12.2	40	24.4	80

Fuente: "Norma para espuma de baja, media y alta expansión". NFPA 11 (2010)

- d. **Cámaras de espuma:** Para determinar el caudal requerido de aplicación por cada tanque se multiplicará la tasa mínima de aplicación de espuma con la sección transversal horizontal del tanque (área incendiada) y para determinar la presión mínima requerida se usará la fórmula general de emisores. Se considera una presión de 40 psi utilizando el orificio más pequeño para el flujo mínimo y 100 psi utilizando el orificio más grande para el flujo máximo, los fabricantes nos proporcionan la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Factor K de cámaras espuma

Modelo	Rango de flujo	Factor “k”
NATIONAL FOAM	GPM	GPM/PSI^{1/2}
MCS-9	49 a 151	7.8 a 15.1
MCS-17	94 a 279	14.9 a 27.9

Fuente: “Norma para espuma de baja, media y alta expansión”. NFPA 11 (2010)

- e. Generadores de espuma: Se considera una presión de 40 psi utilizando el orificio más pequeño para el flujo mínimo y 150 psi utilizando el orificio más grande para el flujo máximo, los fabricantes nos proporcionan la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Factor K de descarga de generadores de espuma

Modelo	Rango de flujo	Factor “k”
NATIONAL FOAM	GPM	GPM/PSI^{1/2}
SPS-9	6.7 a 79.6 31.1 a 197.7	1.2 a 6.5 5.6 a 16.1

Fuente: “Norma para espuma de baja, media y alta expansión”. NFPA 11 (2010)

5.3.2 Caudales y presiones mínimas para el sistema de espuma

La determinación detallada de los parámetros mínimos requeridos (teóricos) por el sistema de sofocación, así como también las formulas usadas se encuentran en el Anexo 1, sin embargo a continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 5.7: Parámetros mínimos del sistema de sofocación

Tanque	# Generadores o Cámaras Espuma	Dotación de espuma	Caudal x Cámara o generador	Modelo Cámara o Generador	Factor k	(*)Presión mín. Requerida
						PSI
TQ-1	1	55	61.22	MCS-9	9	46.24
TQ-5	2	27	22.70	SPS-9	5	20.62
TQ-6	1	70	77.59	MSC-9	12	41.77
TQ-7	1	70	78.07	MCS-9	12	42.30
TQ-8	1	115	128.32	MCS-17	20	41.13
TQ-9	1	145	161.46	MCS-17	24	45.23
TQ-10	2	50	42.06	SPS-9	8	27.62
TQ-11	3	56	31.25	SPS-9	5	39.03
TQ-30	1	53	50.00	MCS-9	8	6.07

* $P_{min} = (Q/K)^2$; P_{min} = Es la presión mínima requerida por la cámara o generadora de espuma

5.4 Sistema de enfriamiento en tanques

El sistema de enfriamiento está conformado por uno o más anillos de tuberías que rodean al tanque de combustible que tiene instalado cada cierto tramo una boquilla pulverizadora de agua (Spray Nozzle), el objetivo de estas boquillas es refrigerar la superficie afectada por una radiación térmica igual o mayor a 12.5 KW/m² conforme al estudio de riesgos del Terminal Juliaca. Además, está conformado por monitores de agua contra incendio alrededor de los tanques de combustible con el objetivo de refrigerar la porción de techo afectado por la radiación térmica.

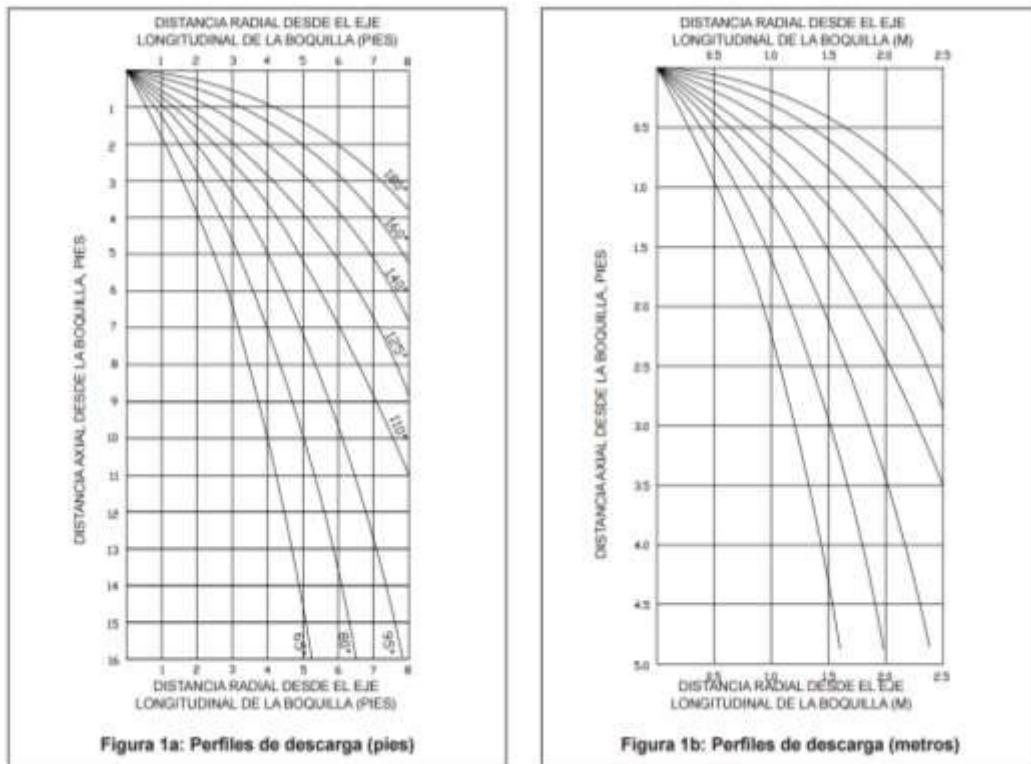
5.4.1 Parámetros iniciales

El área a enfriar, es el área afectada por una radiación térmica igual o mayor a 12.5 Kw/m² y el Rate de agua a usar para el enfriamiento mediante un toroide es de 0.15 GPM/pie², de acuerdo al DS- 043-2007-EM, articulo 92, inciso (a). Además, el número de aspersores se define de forma manual y gráfica por cada tanque, teniendo algunas consideraciones como; la separación entre aspersores no debe ser mayor a 3.0 m, de acuerdo a la norma NFPA 15 (s 7.1.8, 2012) y el traslape de las coberturas de los aspersores que se

está considerando para la distribución de boquillas no debe ser menor a 15 cm de la cobertura total, de acuerdo a las buenas prácticas de ingeniería de protección contra incendio. La presión mínima en la boquilla hidráulicamente más alejada es 20 psi, de acuerdo a lo estipulado en la norma NFPA 15 (s 8.1.2, 2012) y la presión máxima de descarga del aspersor es de 175 psi, esta última de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.

De acuerdo a los proveedores, para una presión de descarga de 10, 20 y 60 PSI en la boquilla de los aspersores (spray nozzle) se obtiene la siguiente gráfica:

Figura 5.4: Perfil de descarga de aspersor considerando 10, 20 y 60 psi



Si la presión de descarga de las boquillas supera los 60 psi, la cobertura tiende a reducirse, sin embargo por la distancia de separación y el ángulo del deflector seleccionado, la cobertura de los aspersores hasta el tanque enfriado no se verá. Para la distribución de boquillas se utiliza aspersores con un ángulo de los deflectores de 125° listado UL y

aprobados FM. En el mercado se puede encontrar los siguientes factores “K” de descarga (ver figura 5.5):

Figura 5.5: Lista de aspersores con certificación UL y FM

Tabla de aprobaciones															
Boquillas de pulverización modelo E Presión máxima de trabajo de 12 bar (175 psi) (consultar también los criterios de diseño en la página 32e.)															
Ref. de la base ¹	SIN ²	Factor K nominal		Angulo	Listados y aprobaciones*			Ref. de la base ¹	SIN ²	Factor K nominal		Angulo	Listados y aprobaciones*		
		U.S.	metrico ³		cULus ⁴	NYC ⁵	FM			U.S.	metrico ³		cULus ⁴	NYC ⁵	FM
12867	VKB10	7.2	103.7	65°	Si	Si	Si	12895	VKB14	7.2	103.7	125°	Si	Si	Si
12868	VKB10	5.6	80.6	65°	Si	Si	Si	12896	VKB14	5.6	80.6	125°	Si	Si	Si
12869	VKB10	4.1	59.0	65°	Si	Si	Si	12897	VKB14	4.1	59.0	125°	Si	Si	Si
12870	VKB10	3.2	46.1	65°	Si	Si	Si	12898	VKB14	3.2	46.1	125°	Si	Si	Si
12871	VKB10	2.3	33.1	65°	Si	Si	Si	12899	VKB14	2.3	33.1	125°	Si	Si	Si
12872	VKB10	1.8	25.9	65°	Si	Si	Si	12900	VKB14	1.8	25.9	125°	Si	Si	Si
12873	VKB10	1.2	17.3	65°	Si	Si	Si	12901	VKB14	1.2	17.3	125°	Si	Si	Si
12874	VKB11	7.2	103.7	80°	Si	Si	Si	12902	VKB15	7.2	103.7	140°	Si	Si	Si
12875	VKB11	5.6	80.6	80°	Si	Si	Si	12903	VKB15	5.6	80.6	140°	Si	Si	Si
12876	VKB11	4.1	59.0	80°	Si	Si	Si	12904	VKB15	4.1	59.0	140°	Si	Si	Si
12877	VKB11	3.2	46.1	80°	Si	Si	Si	12905	VKB15	3.2	46.1	140°	Si	Si	Si
12878	VKB11	2.3	33.1	80°	Si	Si	Si	12906	VKB15	2.3	33.1	140°	Si	Si	Si
12879	VKB11	1.8	25.9	80°	Si	Si	Si	12907	VKB15	1.8	25.9	140°	Si	Si	Si
12880	VKB11	1.2	17.3	80°	Si	Si	Si	12908	VKB15	1.2	17.3	140°	Si	Si	Si

Fuente: <http://www.vikingcorp.com>

5.4.2 Parámetros mínimos requeridos en el aspersor más desfavorable

La estimación detallada de los parámetros mínimos de operación requeridos (teóricos) en los aspersores hidráulicamente más desfavorables del sistema de enfriamiento, así como también las formulas básicas usadas se encuentran en el Anexo 1, sin embargo a continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 5.8: Parámetros mínimos del sistema de enfriamiento

TK	ANILLO DE ENFRIAMIENTO							
	# Asp.	# Anillo s	# Seccione s por anillo	Separació n aspersores (m)	Caudal por asperso r	Factor “K” comercial	Presión mínima (*)	Presión mínima requerida
					GPM	GPM /√PSI	PSI	PSI
TQ-1	14	1	1	1.99	28.34	7.2	20	20.00

TK	ANILLO DE ENFRIAMIENTO							
	# Asp.	# Anillo s	# Seccione s por anillo	Separació n aspersores (m)	Caudal por aspersor	Factor "K" comercial	Presión mínima (*)	Presión mínima requerida
					GPM	GPM /√PSI	PSI	PSI
TQ-5	18	1	1	2.17	20.93	5.6	20	20.00
TQ-6	18	1	1	1.95	29.85	7.2	20	20.00
TQ-7	18	1	1	2.20	31.46	7.2	20	20.00
TQ-8	20	1	1	2.19	34.36	7.2	20	22.77
TQ-9	22	1	2	2.02	35.83	7.2	20	24.77
TQ-10	22	2	1	1.68	23.46	4.1	20	32.75
TQ-11	24	2	1	1.97	22.82	4.1	20	30.97
TQ-30	8	1	1	2.53	16.26	3.2	20	29.36

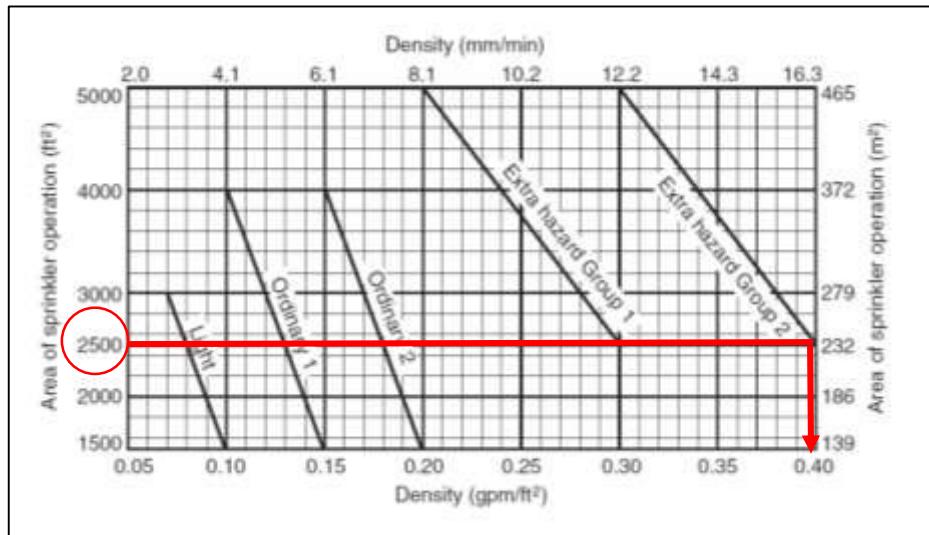
(*) P_{min} ; es la presión mínima requerida por la NFPA 15, sección 8.1.2

5.5 Sistema de extinción de incendio en cuarto de bombas

El sistema de extinción de incendio en el cuarto de bomba está conformado por aspersores o rociadores automáticos (en inglés sprinklers) que forman parte del sistema de protección contra incendio basado en una reserva de agua para el suministro del sistema y una red hidráulica presurizada de la cual son elementos terminales (boquillas de descarga), estos tienen como fin detectar conato (fuego incipiente) de incendio y apagarlo con agua o controlarlo para que pueda ser extinguido por otros medios. La estimación de los caudales mínimos requeridos (teóricos) para el sistema de extinción del cuarto de bombas, conformado por un sistema de rociadores y chorros de manguera están expresados a continuación de acuerdo con lo establecido en la NFPA 13 Y 20.

Las dimensiones del cuarto de bomba es de 8.75 m x 8.35 m, por tanto el área a proteger es de 73.06 m^2 (786.41 pie^2), conocida el área del recinto a proteger, la densidad de aplicación de agua del sistema de rociadores se determina mediante la siguiente curva de densidad/área:

Figura 5.6: Curvas densidad / área



Fuente: "Norma para la instalación de sistemas de rociadores". NFPA 13 (2013)

De la figura anterior (5.6) se considerará una densidad de aplicación de 0.4 gpm/pie², puesto que el área de 786.41 pie² no supera los 2500 pie².

Luego, el caudal mínimo del sistema de rociadores se obtiene al multiplicar el área a proteger y la densidad de aplicación ($786.41 \text{ pie}^2 \times 0.4 \text{ gpm/pie}^2$) resultando un valor 314.56 gpm. Asimismo, el número mínimo de rociadores se obtiene al dividir el área del cuarto de bombas entre el área de cobertura de un rociador ($786.41 \text{ pie}^2 / 100 \text{ pie}^2$) obteniéndose 7 rociadores, aprovechando este valor para estimar el caudal mínimo por rociador, que es obtenido al dividir el caudal mínimo del sistema de rociadores entre la cantidad mínima de rociadores ($314.56 \text{ gpm} / 7$) resultando un valor de 44.94 gpm.

En base a lo explicado en el apartado (2.2.6), la ecuación general de emisores muestra que el factor K para un rociador dado, varía ligeramente con la presión. Además nótese que este factor depende del diámetro interno del orificio de descarga del rociador; y es por lo que los rociadores de mayor tamaño tienen un factor K mayor y por ende se genera mayor caudal, claro está, manteniendo la presión constante, esta interpretación permite seleccionar el rociador más conveniente para proveer la densidad de descarga requerida con

una disponibilidad mínima de presión. En particular, para los rociadores automáticos con orificio de 1/2" (12.7mm) o 7/32" (13.5mm) tienen valores constantes de K=5.6 y K=8 respectivamente (ver figura 5.7).

Figura 5.7: Identificación de características de descarga de rociador

Nominal K-Factor [gpm/(psi) ^{1/2}]	Nominal K-Factor [L/min/(bar) ^{1/2}]	K-Factor Range [gpm/(psi) ^{1/2}]	K-Factor Range [L/min/(bar) ^{1/2}]	Percent of Nominal K-5.6 Discharge	Thread Type
1.4	20	1.3–1.5	19–22	25	1/2 in. NPT
1.9	27	1.8–2.0	26–29	33.3	1/2 in. NPT
2.8	40	2.6–2.9	38–42	50	1/2 in. NPT
4.2	60	4.0–4.4	57–63	75	1/2 in. NPT
5.6	80	5.3–5.8	76–84	100	1/2 in. NPT
8.0	115	7.4–8.2	107–118	140	3/4 in. NPT
				or	
11.2	160	10.7–11.7	159–166	200	1/2 in. NPT
				or	
14.0	200	13.5–14.5	195–209	250	3/4 in. NPT
16.8	240	16.0–17.6	231–254	300	3/4 in. NPT
19.6	280	18.6–20.6	272–301	350	1 in. NPT
22.4	320	21.3–23.5	311–343	400	1 in. NPT
25.2	360	23.9–26.5	349–387	450	1 in. NPT
28.0	400	26.6–29.4	389–430	500	1 in. NPT

Fuente: "Norma para la instalación de sistemas de rociadores". NFPA 13 (2013)

Una vez obtenido los factores del rociador automático, se determina la presión mínima como sigue a continuación:

- **Presión mínima para K=5.6**

Factor de descarga comercial = 5.6 gpm/psi^{0.5}

Caudal por rociador = 44.94 gpm

Presión mínima de un rociador está dada por la siguiente ecuación:

$$P_{min} = \left(\frac{Q_{asp}}{K_{com}} \right)^2 = \left(\frac{44.94}{5.6} \right)^2 = 64.40 \text{ psi}$$

Presión mínima de un rociador para un K=8

Factor de descarga comercial = 8 gpm/psi^{0.5}

Caudal por rociador = 44.94 gpm

Presión mínima de un rociador está dada por la siguiente ecuación:

$$P_{min} = \left(\frac{Q_{asp}}{K_{com}} \right)^2 = \left(\frac{44.94}{8} \right)^2 = 31.56 \text{ psi}$$

De acuerdo a la capacidad de la bomba existente en el Terminal (ver anexo), se verifica que para un caudal de 314.56 gpm se tendrán presiones mayores a los 100 psi por lo que se aseguraría la presión mínima requerida, de lo expuesto anteriormente se considerara para el análisis un K=8. Asimismo la temperatura de activación normalizada de los rociadores automáticos estará en el rango de 57° a 77 ° C (ver Figura 5.8).

Figura 5.8: Rating de temperatura, clasificación y codificación de color

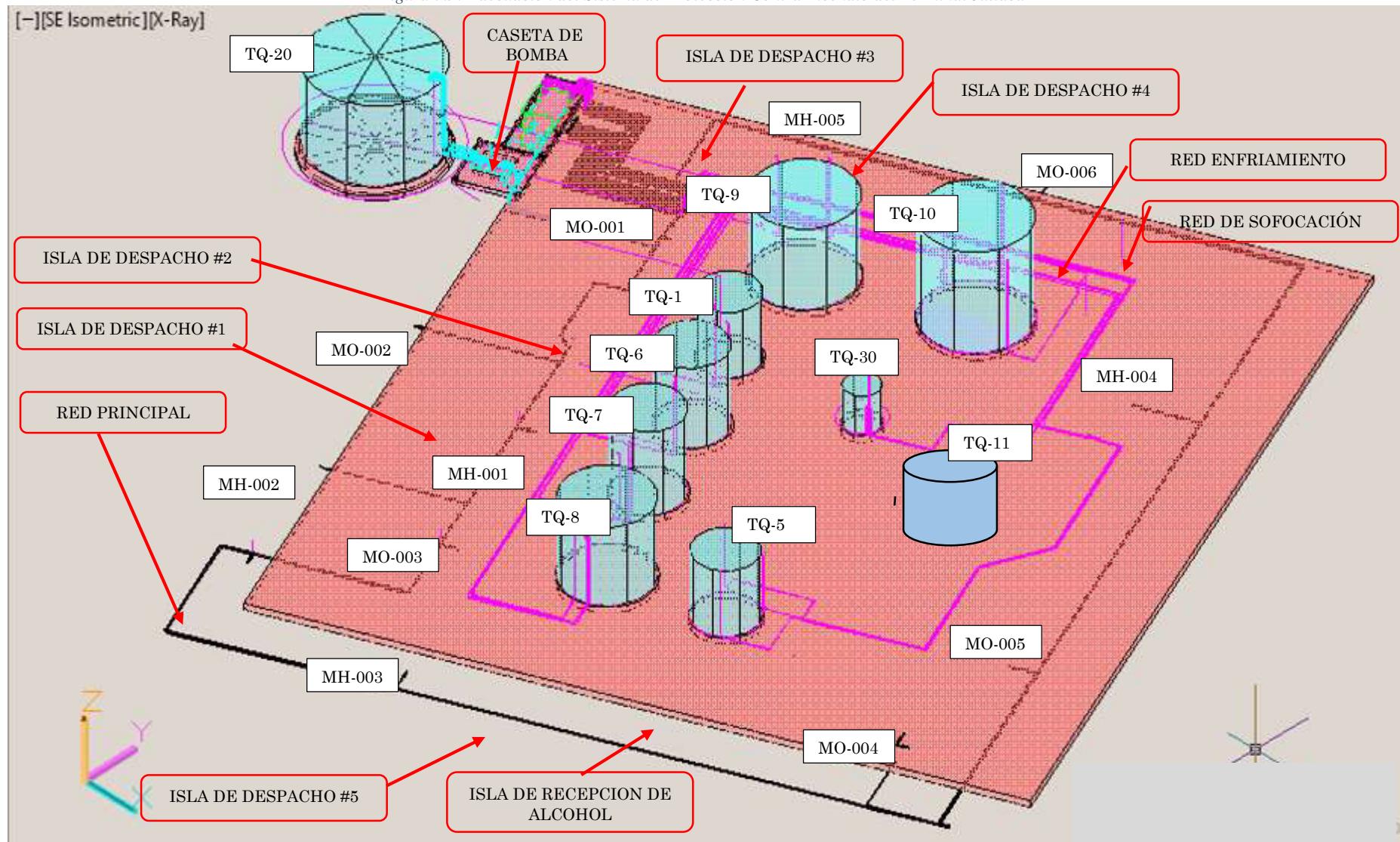
Maximum Ceiling Temperature		Temperature Rating		Temperature Classification	Color Code	Glass Bulb Colors
°F	°C	°F	°C			
100	38	135–170	57–77	Ordinary	Uncolored or black	Orange or red
150	66	175–225	79–107	Intermediate	White	Yellow or green
225	107	250–300	121–149	High	Blue	Blue
300	149	325–375	163–191	Extra high	Red	Purple
375	191	400–475	204–246	Very extra high	Green	Black
475	246	500–575	260–302	Ultra high	Orange	Black
625	329	650	343	Ultra high	Orange	Black

Fuente: “Norma para la instalación de sistemas de rociadores”. NFPA 13 (2013)

5.6 Escenarios probables de Incendio

En base al estudio de riesgos de Terminal Juliaca (INSP-175-11-ES-S-009-3 y GMI-018-15-8-ER-004) se plantean dieciséis escenarios de incendio a tener en cuenta, sin embargo para la presente tesis solo se considerarán diez escenarios de incendio para el análisis hidráulico por ser los de mayor impacto. La importancia de evaluar hidráulicamente cada escenario probable de incendio radica en seleccionar el escenario de mayor requerimiento de agua, esto permitirá conocer la demanda mínima de agua del sistema que garantice la protección ante un evento de incendio dentro de las instalaciones de la planta terminal Juliaca. En la figura 5.9 se muestra las instalaciones del Terminal Juliaca indicando la ubicación de los tanques de almacenamiento(TQ-1, TQ-6, TQ-7, TQ-8, TQ-9, TQ-10, TQ-30, TQ-5 Y TQ-11), tanque de almacenamiento de agua contra incendio(TQ-20), monitores(MO-001, MO-002, MO-003, MO-004, MO-005, MO-006), monitor hidrante (MH-001, MH-002, MH-003, MH-004, MH-005), islas de despachos, isla de recepción, cuarto de bombas y las redes de tuberías(Agua y espuma), esto con el fin de explicar en adelante los escenarios de incendios.

Figura 5.9: Adecuación del Sistema de Protección Contra Incendio del Terminal Juliaca



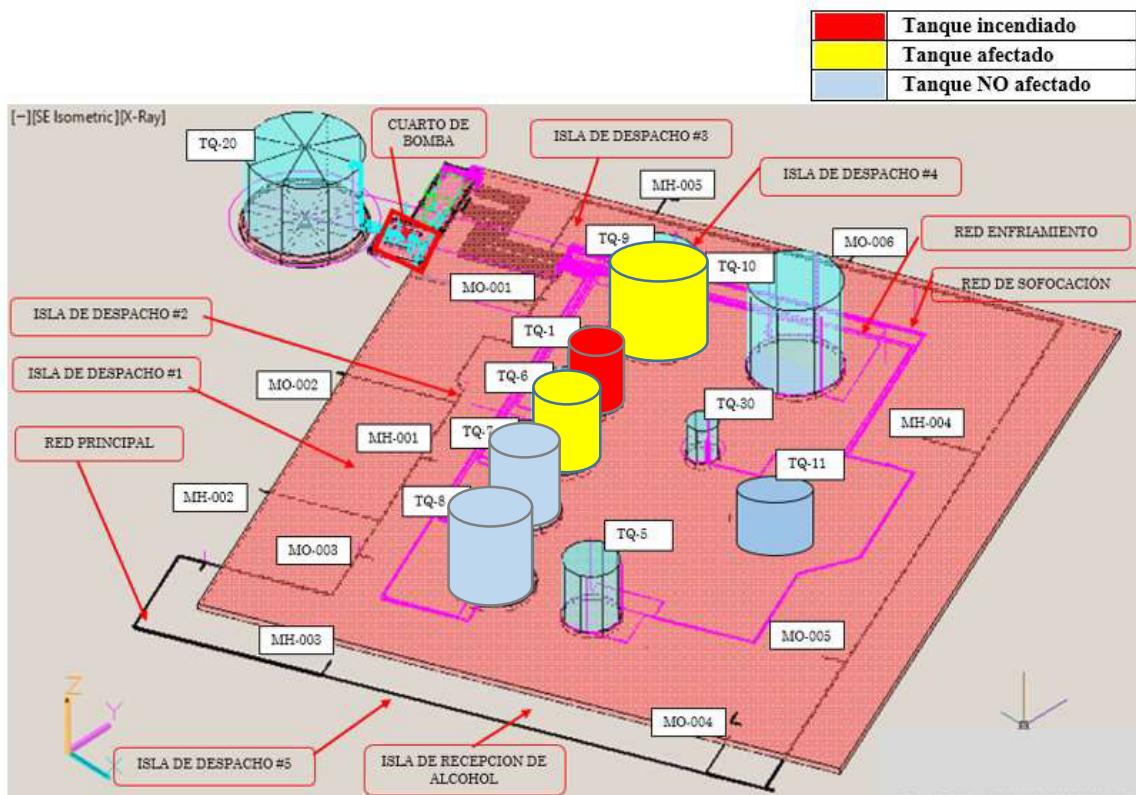
Fuente: Elaboración propia en AutoCAD.

5.6.1 Escenarios del 1 al 9: Incendio en Tanques de combustible

El estudio de riesgos considera un nivel de radiación de 12.6 KW/m² a una altura de interés igual a la altura de los tanques adyacentes al tanque incendiado, ya que a partir de dicho nivel de radiación las instalaciones expuestas necesitan enfriamiento a fin de no ver afectada su estructura. Además considera un nivel de radiación de 5.1 KW/m² a una altura de interés igual a la altura promedio de un hombre(1.60m), ya que a dicho nivel de radiación las personas expuestas y sin protección pueden sufrir quemaduras de primer grado en un tiempo de exposición de 20 segundos. En base a lo anterior se plantean los siguientes nueve escenarios de incendio:

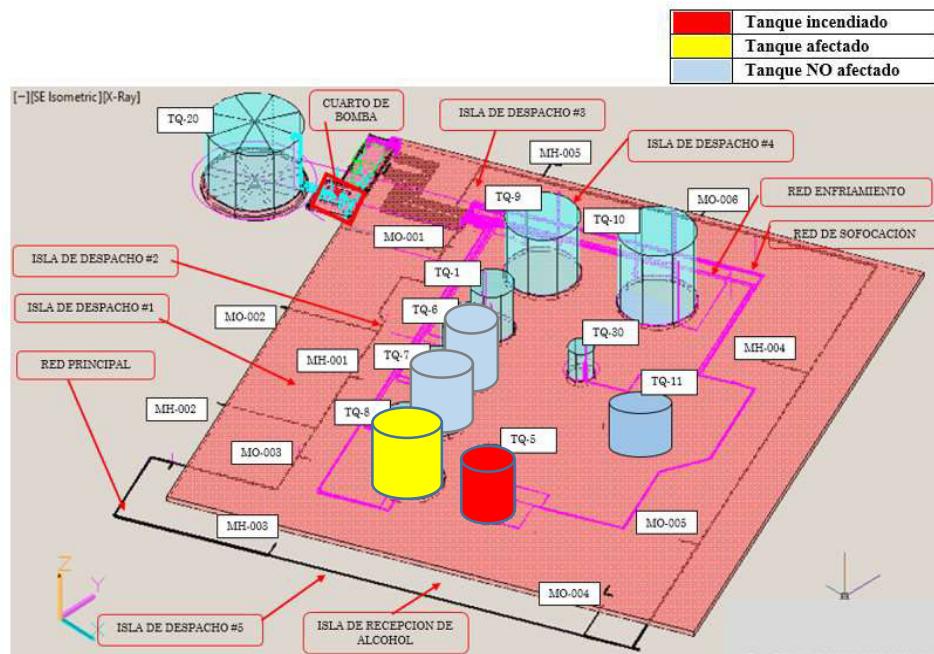
1. En el primer escenario correspondiente al incendio en el TQ-1, se activará su propio sistema de enfriamiento (para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m² será suficiente para causar daños en los tanques TQ-6 y TQ-9 afectando el 100% y 50% de su superficie de casco respectivamente, por lo que se necesitará activar solamente sus sistemas de enfriamiento, además de ello para los mismos tanques(TQ-6 y TQ-9) se deberá activar el monitor MO-001 para enfriar el 50% y 50% de superficie de techo respectivamente.

Figura 5.10: Incendio en tanque TQ-1



2. Se evaluará el segundo escenario correspondiente al incendio en el TQ-5 para el cual se activará su propio sistema de enfriamiento(para enfriar sus paredes) y (para extinguir el fuego), sin embargo su alcance de radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en el tanques TQ-8 afectando el 100% de su superficie de casco, por lo que se necesitará activar su sistema de enfriamiento, además de ello para el mismo tanque(TQ-8) se deberá activar el monitor hidrante MH-003 para enfriar el 50% de su superficie de techo.

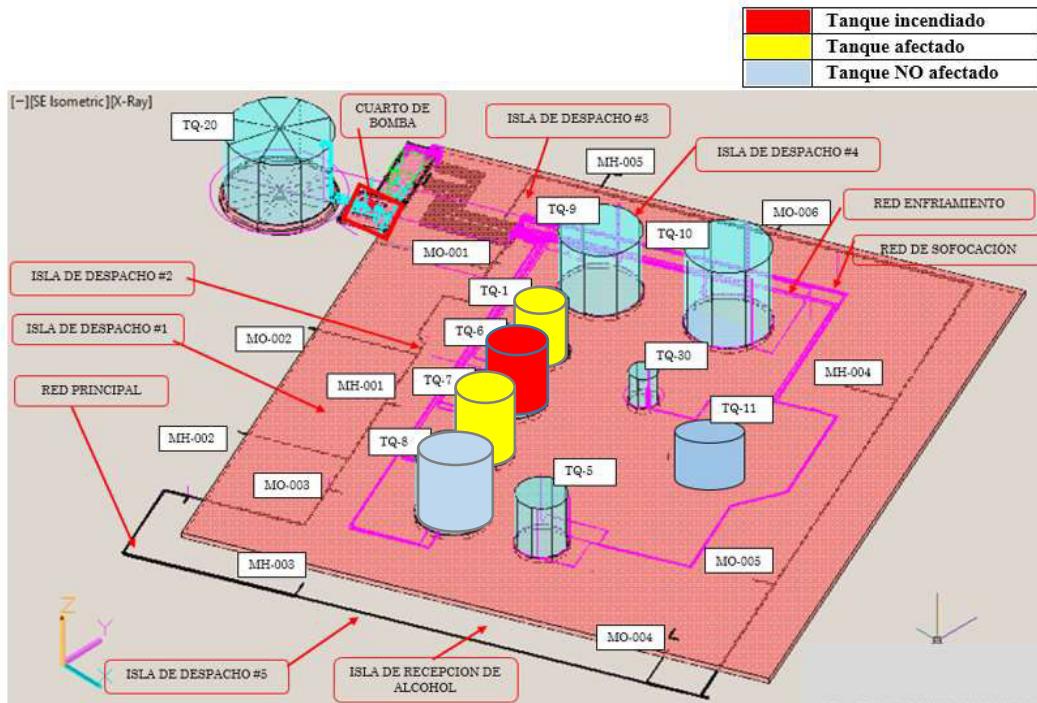
Figura 5.11: Incendio en tanque TQ-5



Fuente: Elaboración propia

3. El tercer escenario correspondiente al incendio en el TQ-6 se activará su sistema de enfriamiento(para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de la radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en los tanques TQ-1 y TQ-7 afectando el 100% y 100% de su superficie de casco respectivamente, por lo que será necesario activar sus sistemas de enfriamiento, además de ello para los mismos tanques(TQ-1 y TQ-7) se deberá activar el monitor MO-001 para enfriar el 50% y 50% de su superficie de techo respectivamente.

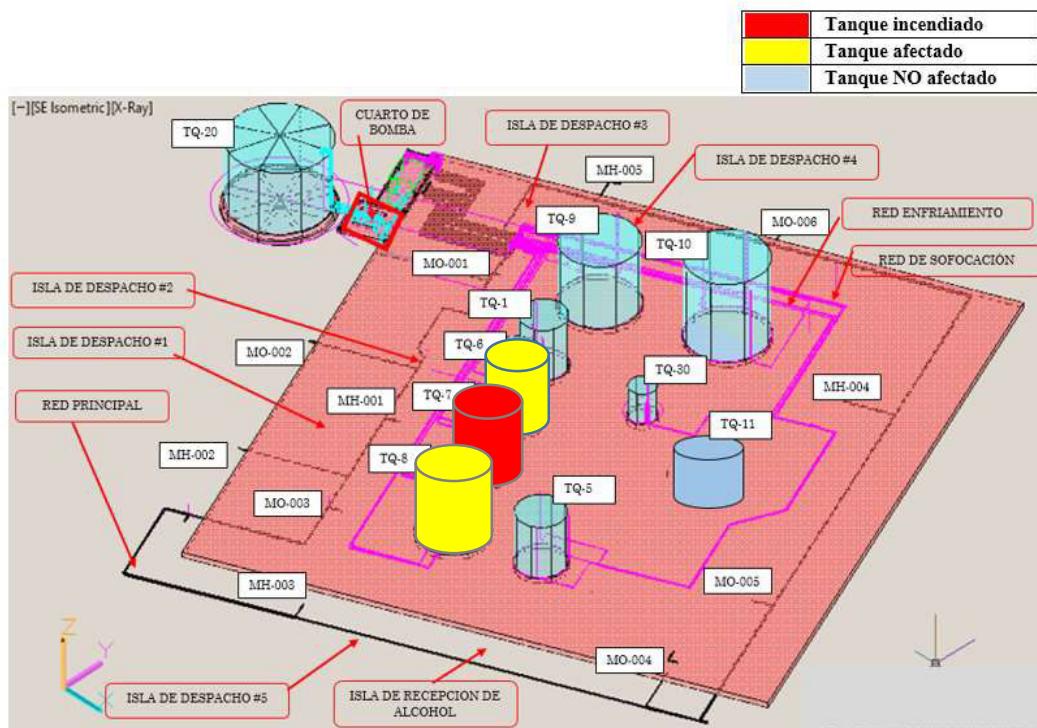
Figura 5.12: Incendio en tanque TQ-6



Fuente: Elaboración propia

4. Para el cuarto escenario de incendio en el TQ-7 se activará el sistema de enfriamiento(para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en los tanques TQ-8 y TQ-6 afectando el 50% y 100% de su superficie de casco respectivamente, por lo que será necesario activar sus sistemas de enfriamiento, además de ello para los mismo tanques (TQ-8 y TQ-6) se activará el monitor MO-003 para enfriar el 50% y 50% de su superficie de techo respectivamente.

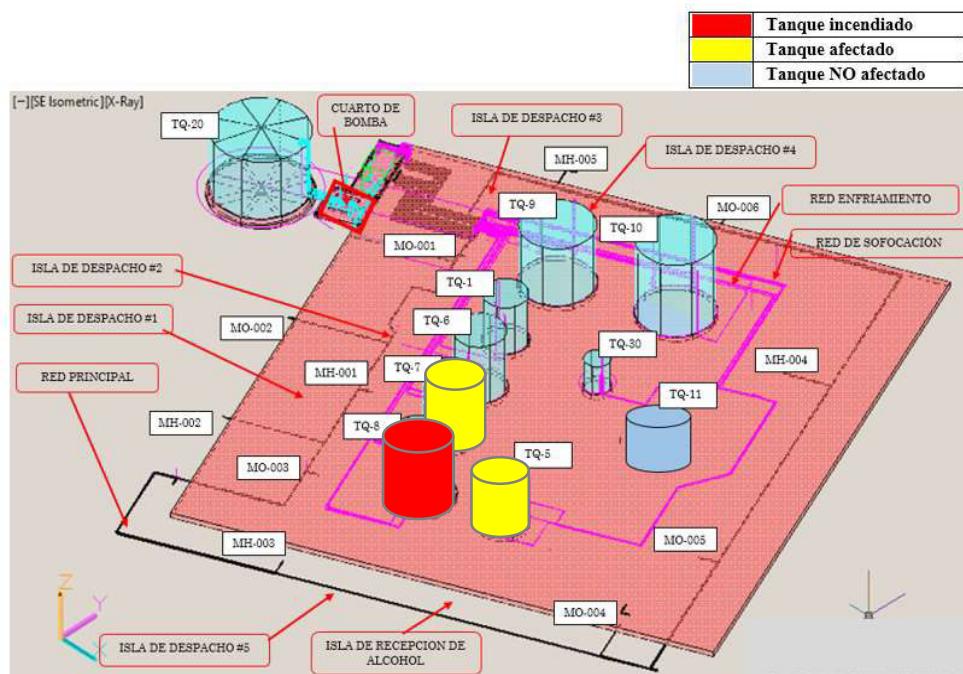
Figura 5.13: Incendio en tanque TQ-7



Fuente: Elaboración propia

5. Se analizará el quinto escenario correspondiente al incendio en el TQ-8 para el cual se activará su sistema de enfriamiento (para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en el tanque TQ-7 y TQ-5 afectando el 100% y 100% de sus superficies de casco respectivamente, por lo que se necesitará activar solamente sus sistemas de enfriamiento, además de ello para los mismos tanques (TQ-7 y TQ-5) se activará el monitor hidrante MH-001 para enfriar el 50% y 50% de su superficie de techo respectivamente.

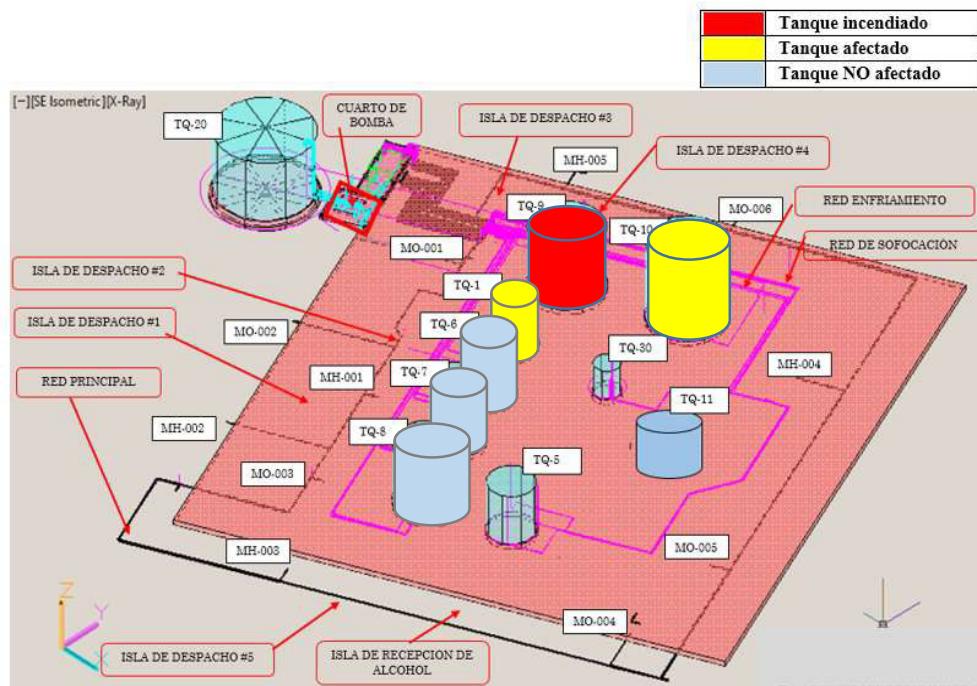
Figura 5.14: Incendio en tanque TQ-8



Fuente: Elaboración propia

6. Para el sexto escenario de incendio en el TQ-9 se activará su sistema de enfriamiento (para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en los tanques TQ-10 y TQ-1 afectando el 50% y 100% de su superficie de casco respectivamente, por lo que se necesitará activar sus sistemas de enfriamiento, además de ello para los mismos tanques (TQ-10 y TQ-1) se activará el monitor MO-001 para enfriar el 50% y 50% de su superficie de techo respectivamente.

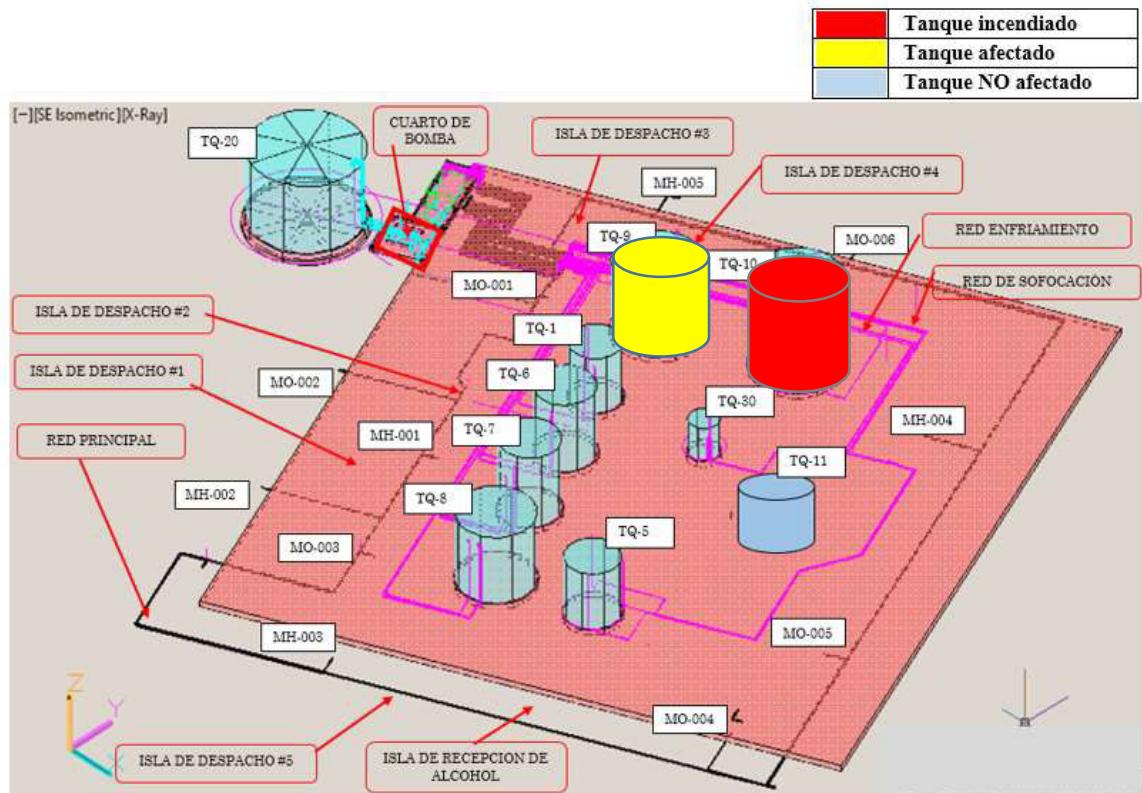
Figura 5.15: Incendio en tanque TQ-9



Fuente: Elaboración propia

7. Se analizará el séptimo escenario correspondiente al incendio en el tanque TQ-10 para el cual se activará su sistema de enfriamiento(para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en el tanque TQ-9 afectando el 50% de su superficie de casco, por lo que se necesitará activar su sistema de enfriamiento, además de ello para el mismo tanque (TQ-9) se activará el monitor hidrante MH-005 para enfriar el 50% de su superficie de techo.

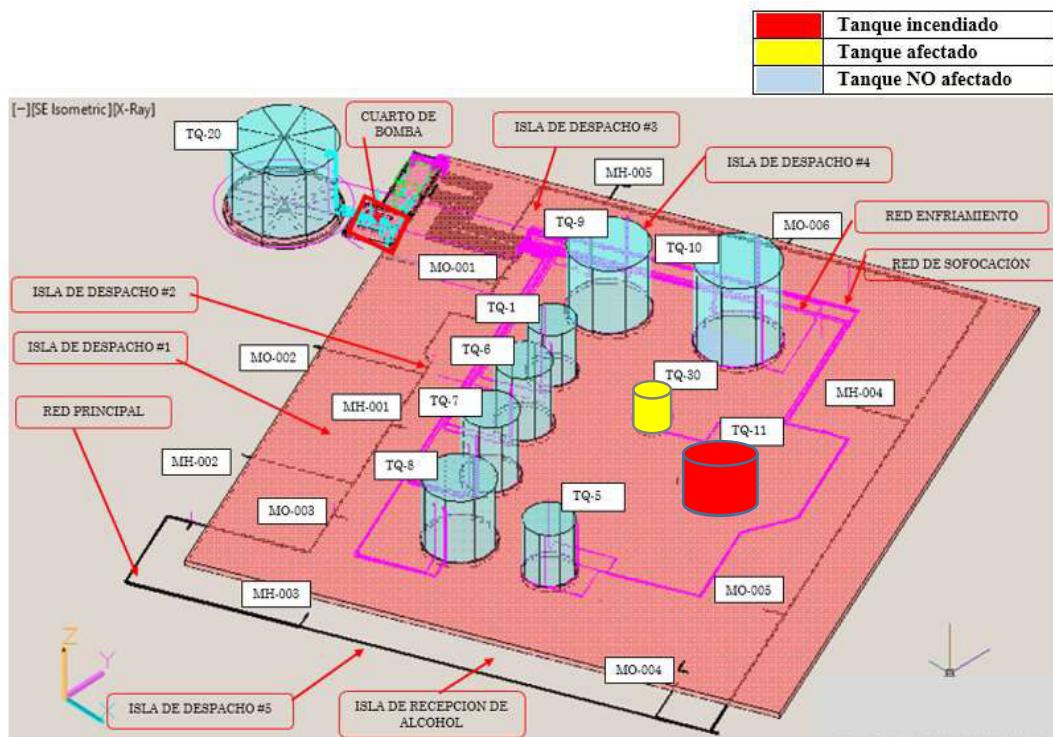
Figura 5.16: Incendio en tanque TQ-10



Fuente: Elaboración propia

8. Para el octavo escenario de incendio en el TQ-11 se activará su sistema de enfriamiento (para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 será suficiente para causar daños en el tanque TQ-30 afectando el 100% de su superficie de casco, por lo que se necesitará activar su sistema de enfriamiento, además de ello para el mismo tanque (TQ-30) se activará el monitor hidrante MH-004 para enfriar el 100% de su superficie de techo.

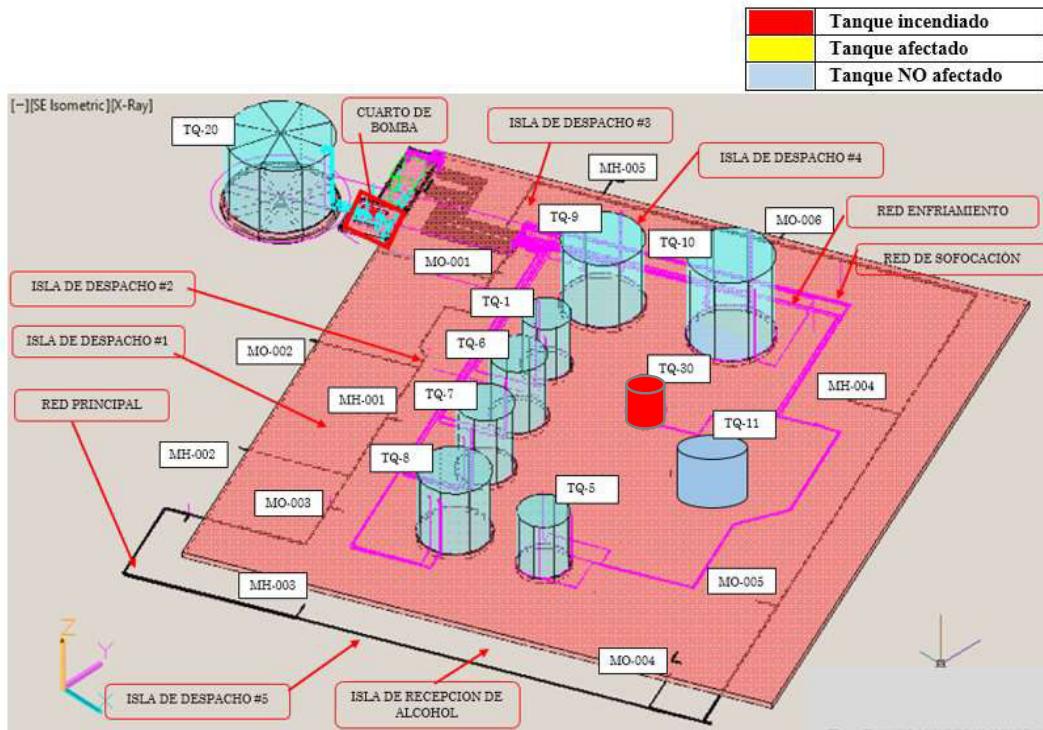
Figura 5.17: Incendio en tanque TQ-11



Fuente: Elaboración propia

9. Para el noveno escenario correspondiente al incendio en el TQ-30 se activará su sistema de enfriamiento (para enfriar sus paredes) y sofocación (para extinguir el fuego), sin embargo el alcance de su radiación térmica de 12.6 KW/m^2 no será suficiente para causar daños en los tanques adyacentes a este.

Figura 5.18: Incendio en tanque TQ-30



Fuente: Elaboración propia

5.6.2 Escenarios del 10 al 15: Incendio en zona de Islas

El estudio de riesgos considera eventos de incendios no confinado producto de un derrame provocados por rotura de manguera durante la recepción y por agujero en brazo de carga durante el despacho de combustibles, por ello, de producirse un incendio en una de las Islas de Despacho 1, 2, 3, 4 o 5 se activarán los monitores MO-002, MH-001, MH-005, MH-005, MH-003 respectivamente y para un incendio en la Isla de recepción de alcohol se activará MH-003, todo ello teniendo como criterio la protección contra incendio en estas zonas. Sin embargo en la presente tesis no será tomada en cuenta estos escenarios por tener una bajo impacto de incendio.

5.6.3 Escenario 16: Incendio en la caseta de bomba

La caseta de bombas deberá estar protegida con rociadores contra incendio de acuerdo con lo establecido en la NFPA 13, puesto que la ocupación es considerada como Riesgo Extra Grupo 2. De ocurrir un incendio en esta área se deberá activar el sistema de rociadores propio de la caseta de bomba.

Por otra parte, en la Tabla 5.9 se muestra un resumen de todos los eventos probables de incendios explicados anteriormente y que serán considerados para el análisis hidráulico.

Tabla 5.9: Escenarios probables de incendio

Escenario	Tanque incendiado	% de Superficie de casco a enfriar	% de Superficie de techo a enfriar	Equipos activados
1	TQ-1	100% de TQ-1 50% de TQ-9 100% de TQ-6	50% de Techo de TQ-9 y 50% de Techo de TQ-6	MO-001
2	TQ-5	100% de TQ-5 100% de TQ-8	50% de Techo de TQ-8	MH-003
3	TQ-6	100% de TQ-6 100% de TQ-1 100% de TQ-7	50% de Techo de TQ-1 y 50% de Techo de TQ-7	MO-001
4	TQ-7	100% de TQ-7 50% de TQ-8 100% de TQ-6	50% de Techo de TQ-8 y 50% de Techo de TQ-6	MO-003
5	TQ-8	100% de TQ-8 100% de TQ-7 100% de TQ-5	50% de Techo de TQ-7 y 50% de Techo de TQ-5	MH-001
6	TQ-9	100% de TQ-9 50% de TQ-10 100% de TQ-1	50% de Techo de TQ-10 y 50% de Techo de TQ-1	MO-001
7	TQ-10	100% de TQ-10 50% de TQ-9	50% de Techo de TQ-9	MH-005
8	TQ-11	100% de TQ-11 100% de TQ-30	100% de Techo de TQ-30	MH-004
9	TQ-30	100% de TQ-30	No requiere	MH-005

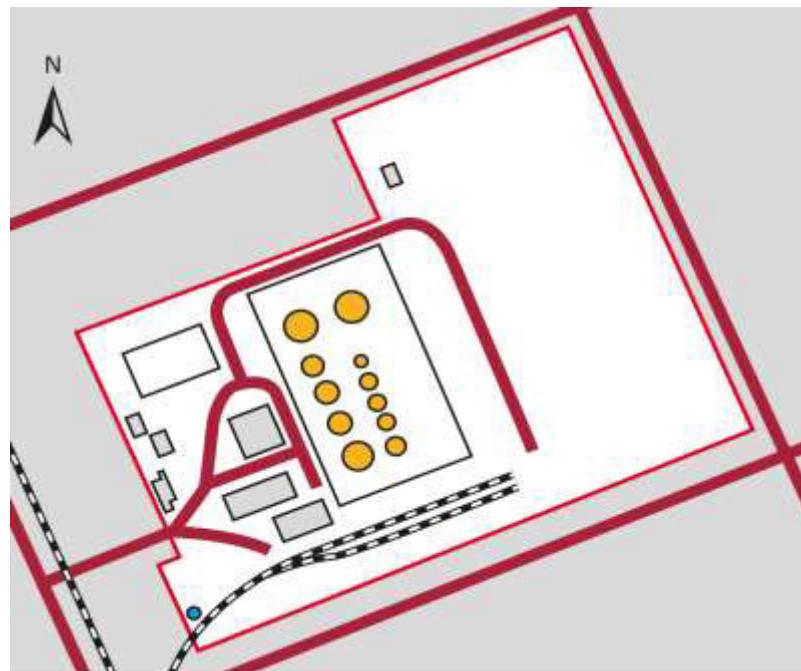
Escenario	Tanque incendiado	% de Superficie de casco a enfriar	% de Superficie de techo a enfriar	Equipos activados
10	Incendio Cuarto de Bomba		Se activará sistema de rociadores propios del cuarto de bomba	

5.7 Modelo matemático de la red del SPCI

Para el análisis hidráulico de las redes del sistema de protección contra incendio (SPCI) en la planta terminal Juliaca se construye un modelo matemático detallado en WaterCAD. Inicialmente se realiza un levantamiento topográfico de la red de enfriamiento, red de sofocación, tanque de almacenamiento de agua, bomba, cámaras de espuma, generadores de espuma, sistema de rociadores pulverizadoras para los tanques de almacenamiento de hidrocarburos y rociadores automáticos para el cuarto de bombas.

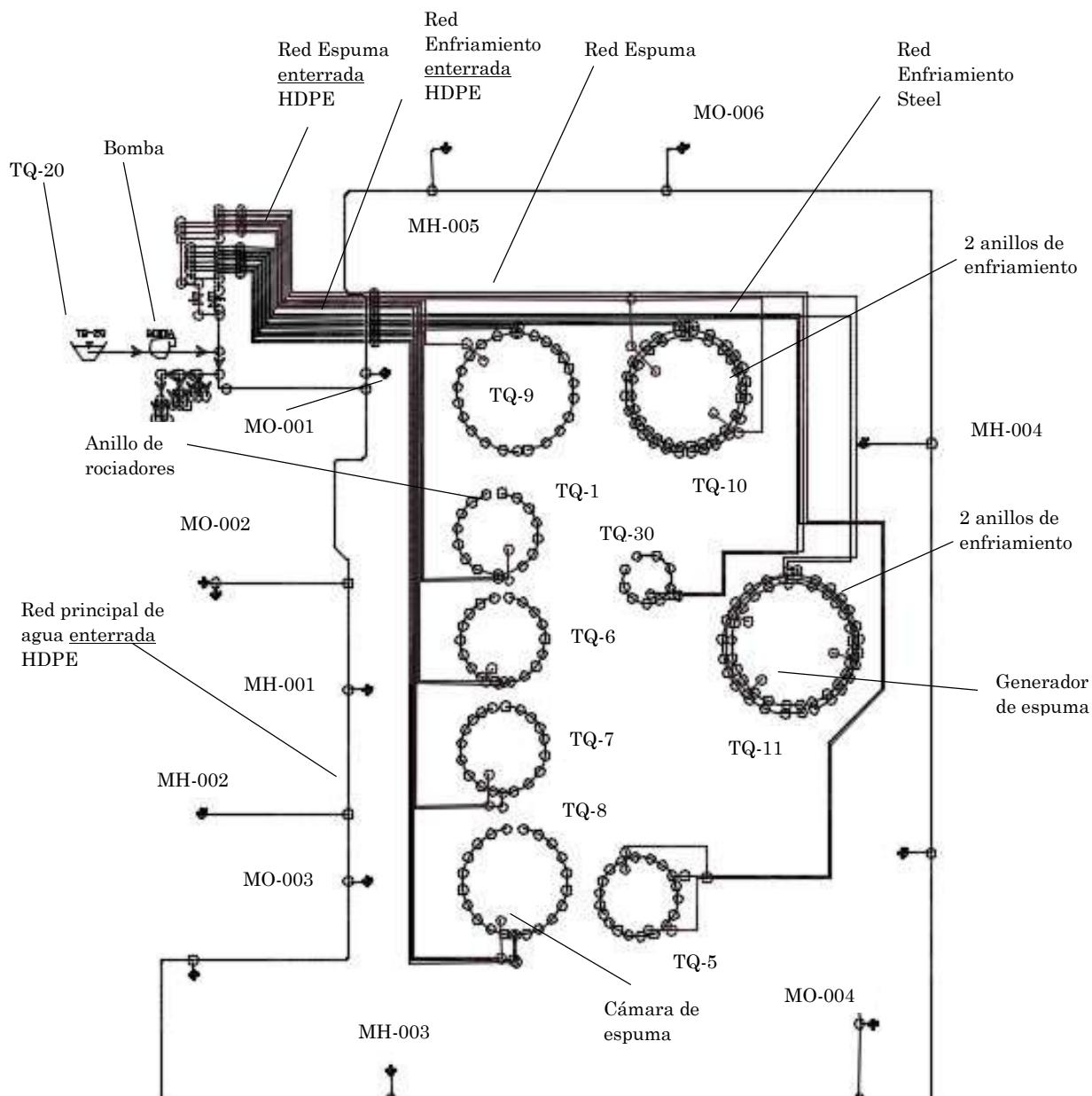
Obsérvese que en la figura (5.20) existen tuberías enterradas, esto es planteado de acuerdo al plano de emplazamiento geográfico del terminal Juliaca (ver Figura 5.19), en donde se puede apreciar que existen vías de transito establecidos y que las redes de tuberías se tienen que adecuar convenientemente, por lo anterior se considera que las tuberías de sistema de enfriamiento y espuma que pasen por debajo de la vía de transito de cisternas o camiones, serán de polietileno HDPE 4710 que cumplan con la norma AWWA C906 y aprobados por Factor Mutuals (FM) para el uso en sistemas de protección contra incendio, según lo establecido en la sección 10.1 de la NFPA 24. Además, para la red de tuberías ubicadas por encima del nivel del piso se va a considerar de acero ASTM A53 Gr.B Sch 40 sin costura, esto según la sección 6.3.1 de la NFPA 13(Edición 2016). Los coeficientes de Hazen-Williams para para la simulación de la caída de presión producto de la fricción del agua en las tuberías de Hdpe y Acero son C=150 y C=120 respectivamente.

Figura 5.19: Plano de emplazamiento del Terminal Juliaca



Fuente: <https://www.oiltanking.com/en/search.html>

Figura 5.20: Modelo detallado de la red en WaterCAD



Fuente: Elaboración propia en WaterCAD V8i

En la figura (5.19), se aprecia el modelado los anillo enfriamiento mediante elementos “línea” que representan a las tuberías que rodean al tanque de hidrocarburos líquidos, los cuales tienen instalados en cada cierto tramo una boquilla pulverizadora de agua(Spray nozzle) representada mediante elemento “nodo”, sin embargo hay que resaltar que para tanques que tienen una altura mayor a 12 metros se considera dos anillos dos anillos de enfriamiento conforme a lo requerido por el estándar de Oiltanking(Empresa operadora del

Terminal) como es el caso de los tanques TQ-10 y TQ-11. La forma de modelar los rociadores (automáticos o pulverizadores), así como las cámaras de espuma, generadores de espuma, monitores o hidrantes, es utilizando la ecuación de emisores que se explicaron en capítulos anteriores y que está incluida en WaterCAD como una propiedad de los nodos de consumo como se ha explicado el emisor de flujo relacionada la descarga o caudal del emisor en función a la presión que se presenta en dicho punto usando la siguiente ecuación:

$$Q = K(P)^n$$

Donde:

Q : Es el caudal expresado en gpm.

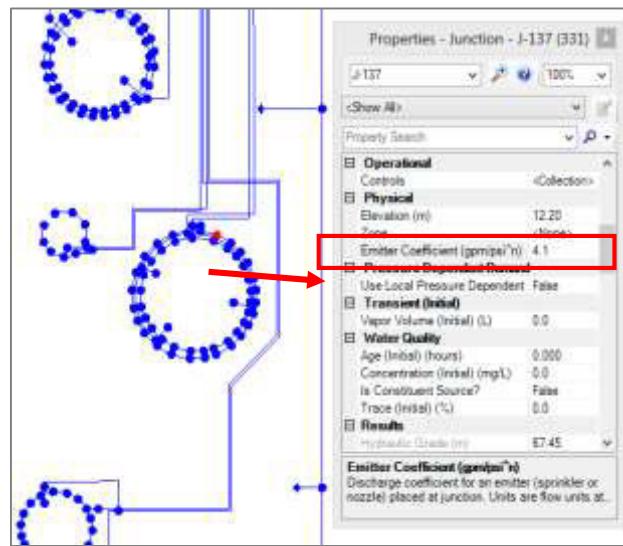
K : Es el coeficiente del emisor o de descarga.

P : Presión expresada en psi.

n : Es un exponente que usualmente toma el valor de 0.5 (El programa usa por defecto este valor).

Por ejemplo; para los nodos que representan a los rociadores pulverizadores en el tanque TQ-11 les corresponde un $K=4.1 \text{ gpm}/\text{psi}^{0.5}$ (ver Tabla 5.8) que debe ser ingresado en el programa mediante la propiedad “Emitter Coefficient” como se muestra en la figura (5.21), de igual forma para los nodos que representan a los generadores de espuma ubicados en este tanque se le ingresa un $K=5 \text{ gpm}/\text{psi}^{0.5}$ (ver Tabla 5.7), este proceso se realiza para cada uno de los rociadores, cámaras o generadores de espuma según el tanque de almacenamiento de hidrocarburo líquidos. Por otra parte, para los elementos nodos que representan a los monitores e hidrantes se está considerando un $K=50 \text{ gpm}/\text{psi}^{0.5}$ para su modelación y simulación.

Figura 5.21: Coeficiente de emisor en WaterCAD



Fuente Elaboración propia

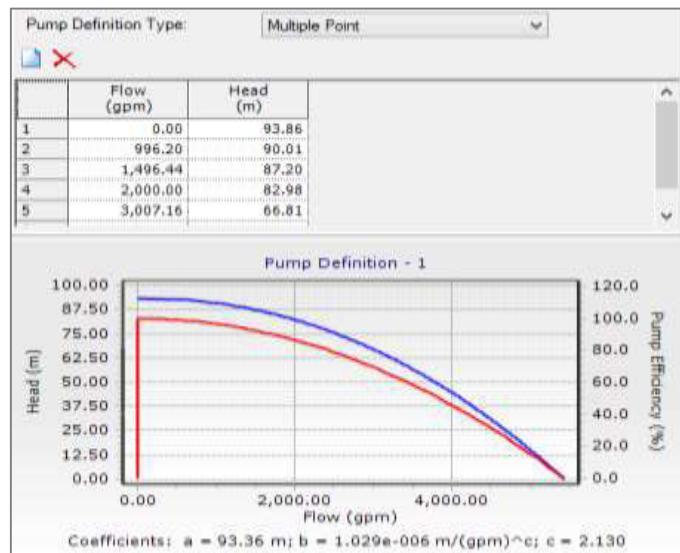
En relación al modelado del sistema de bombeo, esto se realiza a través de la propiedad “Pump definitions” en el que se ingresa los parámetros de la curva característica de la bomba contra incendio (ver Tabla 5.10 y Figura 5.22).

Tabla 5.10: Parámetros de la curva de la bomba contra incendio

Flujo de la Bomba contra incendio(gpm)	Altura de bombeo(m)
0	93.86
996.2	90.01
1496.44	87.20
2000	82.98
3007.16	66.81

Fuente: “Reporte de mantenimiento”, GMT-CT (2015)

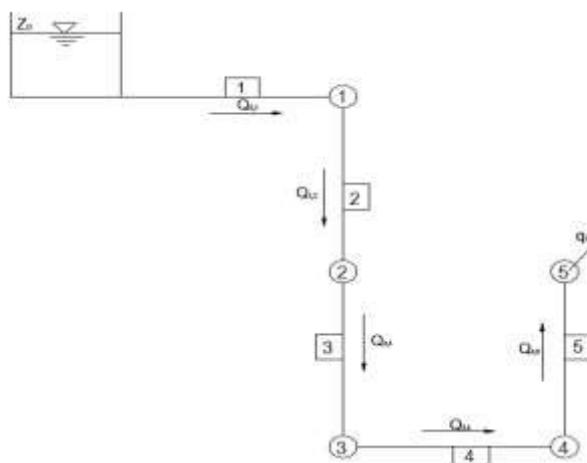
Figura 5.22: curva de la bomba contra incendio



5.8 Criterio de optimización mediante Algoritmos Genéticos

El criterio de optimización se plantea a través de un ejemplo simple con fines explicativos, es decir se intenta explicar el mecanismo o funcionamiento de los algoritmos genéticos aplicado a las redes de tuberías. Considérese una red conformado por 5 tuberías (ver figura 5.23) en donde se requiere conocer los diámetros óptimos de la red propuesta de tal manera de que la presión mínima en el punto 5 sea igual 10 mca.

Figura 5.23: Red de tuberías simple



Fuente: Elaboración propia

Como primer paso, se plantea las ecuaciones de energía entre el punto 0 y el punto 5, se tiene:

$$z_o + \frac{p_o}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g} = z_5 + \frac{p_5}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} + \sum_0^5 h_f \quad (15)$$

Se plantea las ecuaciones de continuidad:

$$q_5 = Q_{0,1} = Q_{1,2} = Q_{2,3} = Q_{3,4} = Q_{4,5} \quad (16)$$

Además, para el caso en particular se considera la ecuación de Hazen –Williams para la estimación de las pérdidas de energía por fricción:

$$h_f = 10.6744 \frac{l}{C^{1.852} D^{4.871}} Q^{1.852} \quad (17)$$

Luego, se reemplaza la ecuación (5.8.3) y (5.8.2) en la ecuación (5.8.1), dando como resultado la siguiente ecuación matemática:

$$\begin{aligned} H_5 = Z_o - & \left[Z_5 + \frac{16(q_5)^2}{2g\pi^2(d_5)^4} \right. \\ & \left. + 10.6744 \left(\frac{q_5}{C} \right)^{1.852} \left(\frac{l_1}{(d_1)^{4.87}} + \frac{l_2}{(d_2)^{4.87}} + \frac{l_3}{(d_3)^{4.87}} + \frac{l_4}{(d_4)^{4.87}} + \frac{l_5}{(d_5)^{4.87}} \right) \right] \end{aligned}$$

Considérese los siguientes datos:

$$Z_o = 40 \text{ m}$$

$$Z_5 = 29 \text{ m}$$

$$q_5 = 0.006 \frac{m^3}{s}$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 150$$

$$l = l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = 15 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned} H_5 &= 40 - \left[29 + \frac{16(0.006)^2}{2g\pi^2(x_5)^4} \right. \\ &\quad + 10.6744 \left(\frac{0.006}{150} \right)^{1.852} \left(\frac{15}{(x_1)^{4.87}} + \frac{15}{(x_2)^{4.87}} + \frac{15}{(x_3)^{4.87}} + \frac{15}{(x_4)^{4.87}} \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{15}{(x_5)^{4.87}} \right) \right] \end{aligned}$$

En efecto, se observa una ecuación con dos incógnitas. Por un lado se busca obtener la presión en el punto 5 (H_5), y por otro lado se busca también obtener los diámetros óptimos (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) de la red de tuberías planteada. Frente a lo anterior se plantea agregar una ecuación de mínimo costo conocida como la función objetivo.

5.8.1 Función objetivo de optimización

Se plantea la siguiente ecuación de mínimo costo para encontrar la combinación de diámetros de tuberías que represente el costo mínimo de la red de tuberías, sujeta a determinadas restricciones hidráulicas.

$$\begin{aligned} y(x_j) &= \text{mínimo} \left(\sum_{j=1}^{Nt} c_j(x_j) \times l_j (1 + \vartheta) \right) \\ \vartheta &= \lambda \times \sum_{k=1}^{N_R} \max(0, H_{min,k} - H_k) \end{aligned}$$

Donde:

Nt : Número total de tuberías

l_j : Longitud de la tubería j

c_j : Costo por metro lineal de la tubería j

ϑ : Función de penalización

$H_{min,k}$: Presión mínima en el nodo k

H_k : Presión en el nodo k

Nr : Número de nodos que cumplen con las restricciones de presión.

λ : Factor de penalidad

Para el caso del ejemplo particular, la función objetivo se define de la siguiente forma:

$$y = \min \left((15c_1(x_1) + 15c_2(x_2) + 15c_3(x_3) + 15c_4(x_4) + 15c_5(x_5))(1 + \vartheta) \right)$$

$$\vartheta = 10^3 \times (\max(0, 10 - H_5))$$

Supeditado a la siguiente restricción:

$$H_{min,k} < H_k < H_{max,k}$$

$$10 < H_5 < 20$$

Para dar solución al problema planteado, se trabaja con un conjunto de diámetros discretos y que a su vez estos sean comerciales, por suponer:

<i>Diámetro(in)</i>	<i>costo(Soles/m)</i>
2	10.20
3	15.40
4	16.50
6	17.80
8	23.50
10	25.30

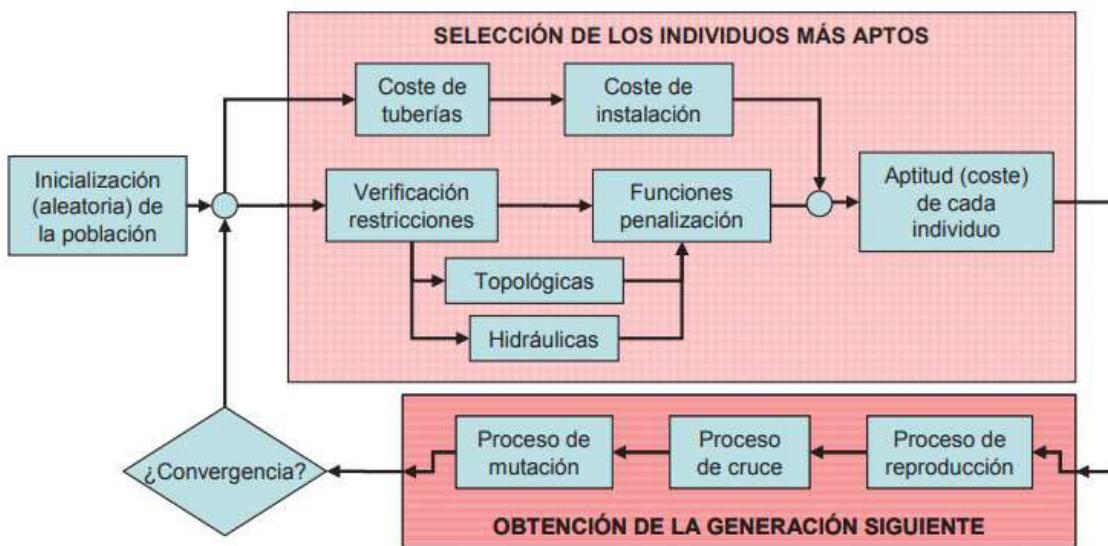
Para el caso del ejemplo, se tiene una red con 5 tuberías y se considera 6 diámetros discretos, entonces de acuerdo a la literatura el número de soluciones para dicha red es de $6^5 = 7776$, esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, pese a ello aquellas soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto.

En vista de las numerosas soluciones, se recurre al método de los algoritmos genéticos para la búsqueda aleatoria por el espacio de solución con el fin de encontrar el conjunto de diámetros que representen una posible solución al ejemplo planteado.

5.8.2 Funcionamiento de los algoritmos genéticos

En términos simples, un algoritmo genético consiste en tres operadores básicos: Selección, cruce y mutación, además de estos operadores básicos, el operador de generación crea la población inicial de cromosomas. Estos operadores se aplican a la generación actual para formar la próxima generación. El Algoritmo Genético (AG) continúa hasta que se hayan alcanzado los criterios de diseño definidos por el usuario. En la figura 5.24 se muestra el funcionamiento del Algoritmo Genético aplicado a la optimización de redes de agua representada a través de un diagrama de flujo. Al principio, se evalúa la población y se determinan sus condiciones físicas. Luego, se seleccionan los individuos exitosos y se reemplazan los no exitosos. El siguiente paso es formar la siguiente población utilizando los operadores cruce y mutación. Estos procesos continúan hasta que se alcanza el número de población predefinido.

Figura 5.24: Algoritmo Genético aplicado al diseño óptimo de redes de agua



Fuente: “Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Analizase eficiencia”. Tesis doctoral. Daniel Mora Meliá. UPV.2012

a. Cromosomas o individuos

Inicialmente se inicia con la generación de una serie de cromosomas o individuos, cada uno de las cuales contiene una posible solución del problema de optimización, esta primera generación es totalmente aleatoria y los cromosomas son ordenados en base a su aptitud. En el problema de optimización planteado, la aptitud de un determinado cromosoma viene dada por el coste asociado a la instalación de la red de agua.

b. Generación

El AG genera una población inicial aleatoria de tamaño definido, se recomienda que este tamaño varíe entre 50 y 200 individuos. Cada población está compuesta por individuos conformada por diámetros comerciales generadas aleatoriamente. Para el ejemplo, se genera una población inicial al azar conformada

por diez individuos (cromosomas) y estos a la vez compuestos por diámetros discretos comerciales para la red de cinco tuberías como se ilustran en la figura 5.25.

Figura 5.25: Población inicial

Red de Tuberías :	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Individuo 1=	8"	2"	2"	3"	8"
Individuo 2=	3"	3"	3"	3"	3"
Individuo 3=	4"	4"	4"	4"	4"
Individuo 4=	4"	4"	4"	3"	2"
Individuo 5=	3"	2"	2"	4"	3"
Individuo 6=	10"	6"	4"	10"	4"
Individuo 7=	8"	8"	8"	8"	6"
Individuo 8=	3"	4"	6"	8"	10"
Individuo 9=	3"	4"	6"	8"	3"
Individuo 10=	8"	6"	3"	2"	8"

Una vez generada la población inicial, el AG determinará la función objetivo, es decir, el costo total. Para el individuo 1, se eligió al azar el valor del diámetro para cada tubería, así pues:

$$x_1 = 8 \text{ in} = 0.2032 \text{ m}; x_2 = 2 \text{ in} = 0.0508 \text{ m}; x_3 = 2 \text{ in} = 0.0508 \text{ m}; x_4 = 3 \text{ in} = 0.0762 \text{ m};$$

$$x_5 = 8 \text{ in} = 0.2032 \text{ m};$$

Luego se reemplaza en la ecuación siguiente, y se obtiene:

$$\begin{aligned}
 H_5 &= 40 - \left[29 + \frac{16(0.006)^2}{2g\pi^2(x_5)^4} \right. \\
 &\quad + 10.6744 \left(\frac{0.006}{150} \right)^{1.852} \left(\frac{15}{(x_1)^{4.87}} + \frac{15}{(x_2)^{4.87}} + \frac{15}{(x_3)^{4.87}} + \frac{15}{(x_4)^{4.87}} \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{15}{(x_5)^{4.87}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_5 = 40 - & \left[29 + \frac{16(0.006)^2}{2g\pi^2(0.2032)^4} \right. \\
& + 10.6744 \left(\frac{0.006}{150} \right)^{1.852} \left(\frac{15}{(0.2032)^{4.87}} + \frac{15}{(0.0508)^{4.87}} + \frac{15}{(0.0508)^{4.87}} \right. \\
& \left. \left. + \frac{15}{(0.0762)^{4.87}} + \frac{15}{(0.2032)^{4.87}} \right) \right]
\end{aligned}$$

$$H_5 = 6.07 \text{ m}$$

Este valor es reemplazado en la función objetivo:

$$\vartheta = 10^3 \times (\max(0, 10 - 6.07)) = 3930$$

$$y = ((15 * 23.5 + 15 * 10.2 + 15 * 10.2 + 15 * 15.4 + 15 * 23.5)(1 + 3930))$$

$$y = 4,880,164.81$$

De igual forma se estima para los demás individuos (se considera una población de Np= 10) y se ordena en el siguiente cuadro:

Red:	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	H_5	$\Sigma c_j(x_j) \times l_j$	y (función Objetivo)
Individuo 1=	8	2	2	3	8	6.07	S/. 1,242.00	S/. 4,880,164.81
Individuo 2=	3	3	3	3	3	9.31	S/. 1,155.00	S/. 792,671.56
Individuo 3=	4	4	4	4	4	10.58	S/. 1,237.50	S/. 1,237.50
Individuo 4=	4	4	4	3	2	7.70	S/. 886.68	S/. 2,043,288.00
Individuo 5=	3	2	2	4	3	5.59	S/. 1,015.50	S/. 4,476,878.97
Individuo 6=	10	6	4	10	4	10.80	S/. 1,521.00	S/. 1,521.00
Individuo 7=	8	8	8	8	6	10.97	S/. 1,677.00	S/. 1,677.00
Individuo 8=	3	4	6	8	10	10.59	S/. 1,477.50	S/. 1,477.50
Individuo 9=	3	4	6	8	3	10.18	S/. 1,329.00	S/. 1,329.00
Individuo 10=	8	6	3	2	8	8.36	S/. 1,356.00	S/. 2,222,922.92

c. Selección

Este operador se usa para eliminar los peores individuos debido a su baja condición física (aquellas que no hacen cumplir las restricciones hidráulicas). Una vez que se determinan sus funciones objetivas en la etapa anterior, un cierto número de individuos con peor condición física se reemplazan por el mismo número de individuos. Para fijar el número de individuos a eliminar y duplicar se define las probabilidades de selección definida por Wang (1991) de la siguiente forma:

$$p_{max} = \frac{\beta}{N_p} ; p_{min} = \frac{2 - \beta}{N_p} ; 1.5 \leq \beta \leq 2$$

$$p_i = p_{min} + (p_{max} - p_{min}) \frac{N_p - i}{N_p - 1}$$

Si $(p_i \times N_p) > 1.5$; el individuo se duplica (mejores soluciones)

Si $0.5 \leq (p_i \times N_p) \leq 1.5$; el individuo se mantiene (soluciones intermedias)

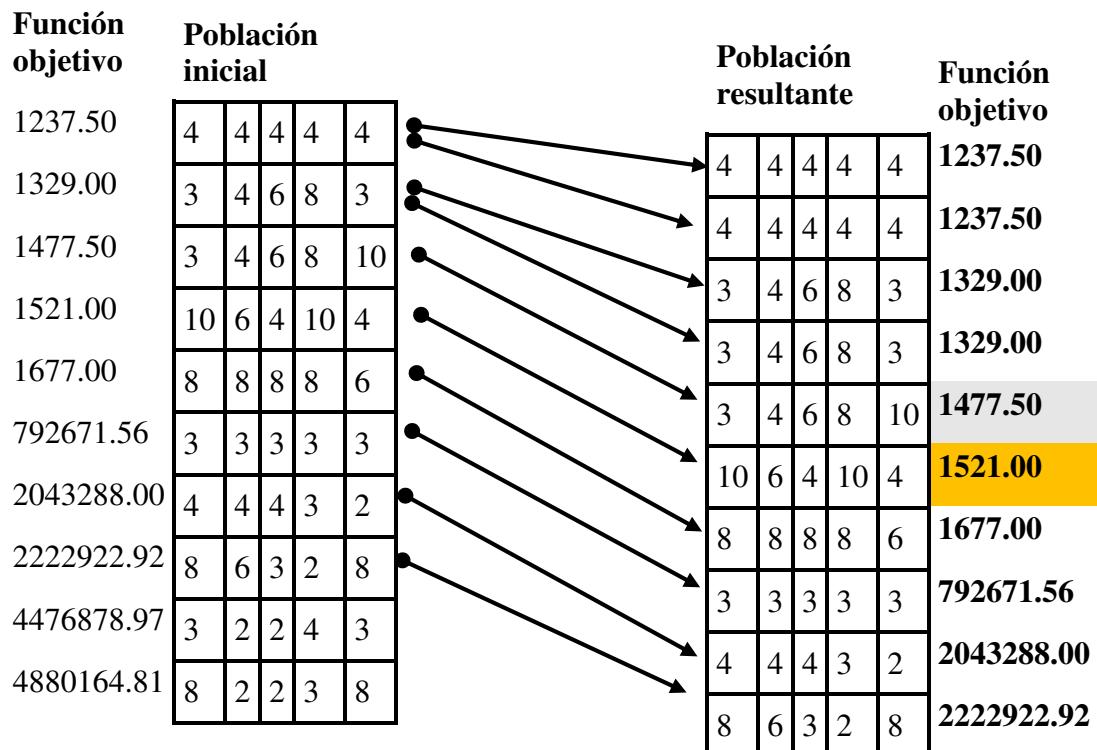
Si $(p_i \times N_p) < 0.5$; el individuo se elimina (peores soluciones)

A través de las siguientes representaciones se puede mostrar la clasificación de supervivencia de cada individuo y el comportamiento del operador selección:

Individuo	y	p_i	$(p_i \times N_p)$	Selección
1	1237.50	0.180	1.8	duplicar
2	1329.00	0.162	1.6222	duplicar
3	1477.50	0.144	1.4444	mantener
4	1521.00	0.127	1.2667	mantener

5	1677.00	0.109	1.0889	mantener
6	792671.56	0.091	0.9111	mantener
7	2043288.00	0.073	0.7333	mantener
8	2222922.92	0.056	0.5556	mantener
9	4476878.97	0.038	0.3778	eliminar
$N_p=10$	4880164.81	0.020	0.2	eliminar

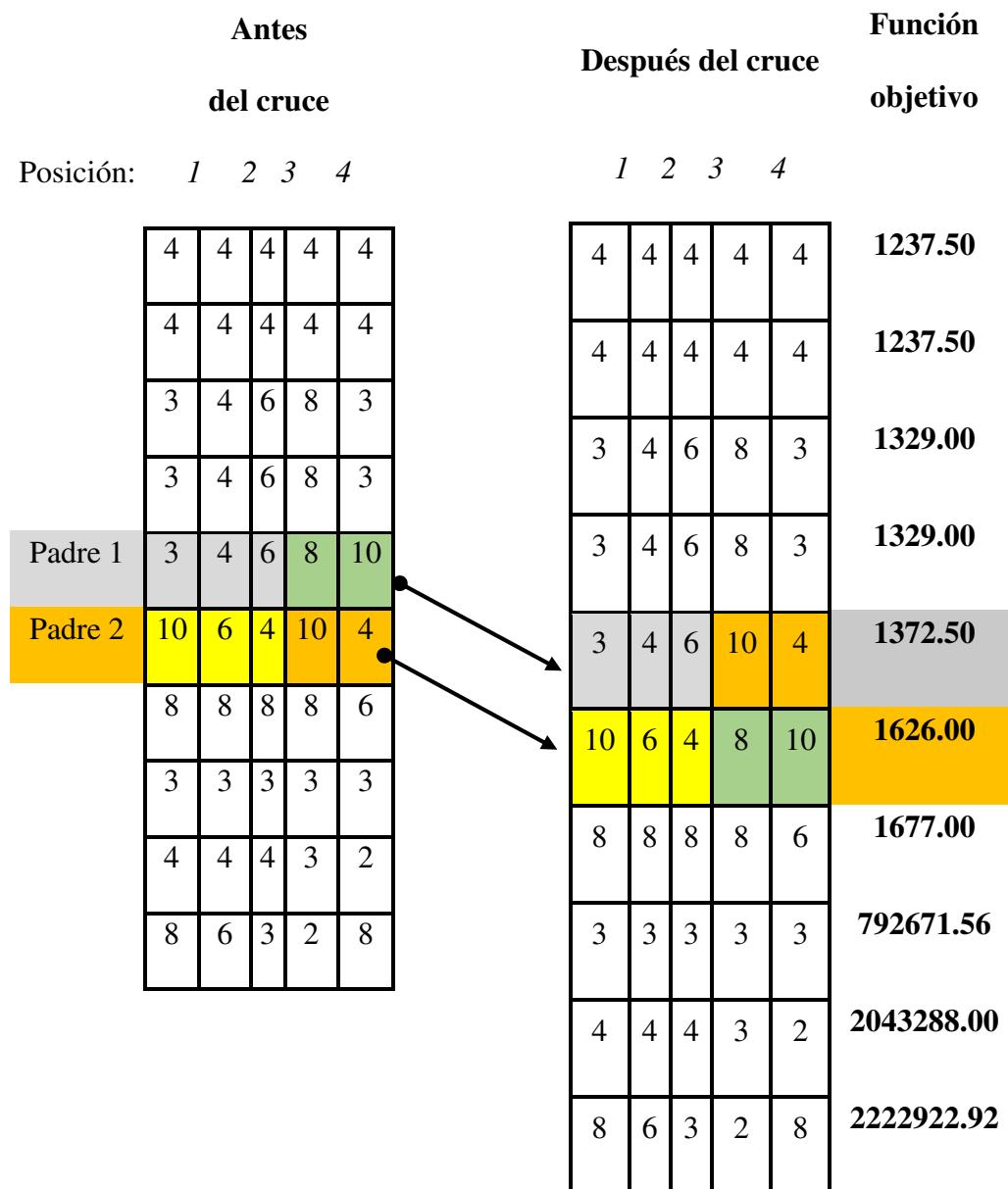
Luego, la población resultante se muestra de la siguiente manera:



d. Cruce

Se aplica para iniciar un intercambio de genes (diámetros) entre dos padres para formar dos hijos de descendencia. El AG elegirá aleatoriamente dos soluciones (individuos) para formar dos hijos, el número total de la probabilidad de cruce (se recomienda $60\% \leq P_c \leq 100\%$) es definido por el usuario al comienzo del estudio. Tener en cuenta que todos los puntos de cruce se seleccionan al azar. En la figura 5.26 se muestra el comportamiento de este operador, en donde para el ejemplo, se selecciona aleatoriamente dos padres, se elige al azar la posición 3 como punto de cruce, luego se intercambia el material genético, en este caso el diámetro de la tubería.

Figura 5.26: Operador de cruce



e. Mutación

El operador de mutación permite alteraciones pequeñas al azar en los genes (diámetros) de un porcentaje de individuos. En la figura 5.27 se muestra el comportamiento de este operador, en donde se selecciona aleatoriamente un

individuo, se elige al azar la posición 4(para el ejemplo) y un diámetro de la lista de diámetros comerciales, en este caso el diámetro 2" es cambiado por un diámetro 10". Resaltar que la literatura recomienda que la probabilidad de mutación (P_m) sea muy pequeña (usualmente entre el 0.1% y el 2%) con el fin de evitar destruir demasiadas soluciones mejoradas.

Figura 5.27: Operador de mutación

Antes de la Mutación	Después de la Mutación	Función objetivo
4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	1237.50
4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	1237.50
3 4 6 8 3	3 4 6 8 3	1329.00
3 4 6 8 3	3 4 6 8 3	1329.00
3 4 6 10 4	3 4 6 2 4	1372.50
10 6 4 8 10	10 6 4 8 10	1626.00
8 8 3 3 3	8 8 3 3 3	1677.00
3 3 8 8 6	3 3 8 8 6	792671.56
4 4 4 3 2	4 4 4 3 2	2043288.00
8 6 3 2 8	8 6 3 10 8	1582.50

Luego de la mutación se genera una nueva población que reemplaza a la anterior y el número de generaciones aumenta, este proceso se repite generalmente

entre 100 y 10000 veces y en cada iteración se almacena la mejor red (costo mínimo), por ende la solución final es la red de menor costo encontrada a través de generaciones sucesivas. Cabe precisar que, si bien la naturaleza de los AG no garantiza que esta solución sea el óptimo global, es de esperar que sea cercano a ella.

f. Condición de convergencia y confiabilidad

La condición de convergencia radica básicamente en realizar un número considerable de generaciones (iteraciones) de modo que exista una convergencia hacia la mejor solución. Mora (2012) afirma: “El ciclo se repite una y otra vez hasta que se cumpla la condición de convergencia. (...), el AG repite el ciclo hasta que se produzca un cierto número de repeticiones sin ninguna mejora en el mejor individuo de la población. Este número debe ser suficientemente alto como para evitar una convergencia temprana en un mínimo local, pero no tanto como para ralentizar excesivamente la convergencia del algoritmo” (p.53). Cuando se cumpla la condición citada, se afirma que se ha encontrado la solución óptima y por consiguiente los resultados obtenidos mediante los algoritmos genéticos serán los correctos. Muchos investigadores como; Goldberg(1989), Wang(1991), Montesinos(1995), Dandy(1996), Liong(1995) y entre otros, demostraron que los algoritmos genéticos son muy eficientes y confiables para resolver problemas de optimización de redes de tuberías a presión.

5.9 Costo de instalación de tuberías del SPCI

De acuerdo a lo explicado en apartado (5.8), para la optimización del SPCI del Terminal Juliaca se planteó una función objetivo y observamos que este depende del costo de instalación de tubería por metro lineal para cierto diámetro comercial. A continuación se presenta la lista de diámetros comerciales y los precios promedios de la instalación tuberías de acero ASTM A53 Gr.B SCH 40 sin costura y polietileno HDPE-SDR11.

Tabla 5.11: Precio de instalación de tuberías de Acero

Steel ANSI-SCH40(C=120)		
Diámetros comerciales(in)	Diámetro interno(in)	Precio S./m
1"	1.049	11.30
1 1/4"	1.380	15.33
1 1/2"	1.610	18.17
2"	2.067	23.86
2 1/2"	2.469	36.67
3"	3.068	47.97
3 1/2"	3.548	65.95
4"	4.026	90.33
5"	5.047	93.60
6"	6.065	117.69
8"	7.981	177.03
10"	10.020	246.81
12"	11.938	337.67

16"	15.000	466.67
18"	16.876	550.00
20"	18.812	616.67
24"	22.624	966.67

Tabla 5.12: Precio de instalación de tuberías Hdpe

HDPE(C=150) SDR11		
Diámetros comerciales(in)	Diámetro interno(in)	Precio S./m
2"	1.917	11.39
3"	2.823	34.13
4"	3.633	36.78
5"	4.491	54.41
6"	5.348	72.41
8"	6.963	112.94
10"	8.678	175.81
12"	10.293	278.86
14"	11.302	424.95
16"	12.975	537.79
18"	14.596	716.79
20"	16.218	907.95
22"	17.840	1019.22
24"	19.462	1114.85

5.10 Metodología para la estimación de los diámetros óptimos del SPCI

EL principio de análisis del Sistema de Protección Contra Incendio (SPCI) se basa en que solamente ocurrirá un escenario de incendio de gran magnitud a la vez dentro de las instalaciones de la Planta Terminal Juliaca, sin embargo esto solo nos permite conocer la mínimo requerimiento de agua que se requiere para combatir un incendio en cualquiera de los diez escenarios, pero lo que se pretende es determinar los diámetros óptimos de las tuberías en cada escenario. Frente a ello, luego de haber creado el modelo matemático del SPCI, se procede a determinar los diámetros de las tuberías en los diez escenarios explicados en el capítulo anterior, por otra parte surge la siguiente pregunta: ¿Cuál es el orden de escenarios a analizar, teniendo en cuenta la optimización de las redes del SPCI? , el orden estará basado en el escenario de mayor a menor requerimiento teórico de agua con el fin de obtener diámetros razonables, para esto, haciendo uso de la Tabla 5.7, 5.8 y 5.9 se obtiene el orden de simulación en función del caudal teórico, como se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 5.13: Orden de análisis para la optimización de las tuberías

Escenario	Q(teórico) en GPM	Incendio	Orden de simulación
6	2362.77	TQ-9	1°
5	2129.70	TQ-8	2°
3	2077.83	TQ-6	3°
4	2025.12	TQ-7	4°
7	1968.63	TQ-10	5°
1	1889.41	TQ-1	6°
8	1264.66	TQ-11	7°
2	1048.68	TQ-5	8°
9	640.12	TQ-30	9°
10	404.46	Cuarto BOMBAS	10°

Fuente: Elaboración propia

Nótese que el mayor requerimiento teórico de agua se dará cuando se activen los dispositivos necesarios para extinguir el fuego en el tanque nueve (TQ-9) y enfriar el casco

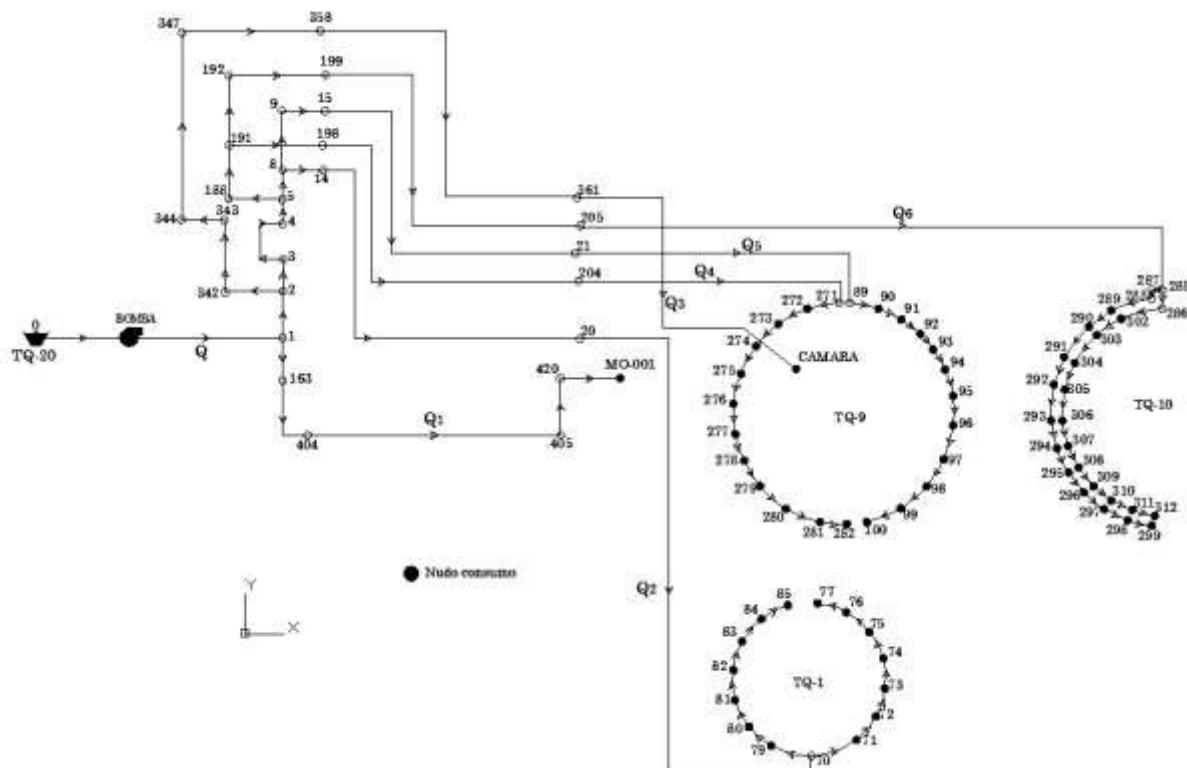
estructural de los tanques vecinos a este, es decir el primer escenario a simular corresponde al escenario N°6, luego se simula los demás escenarios de acuerdo a la tabla (5.14).

5.10.1 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 6

Para iniciar con la estimación de los diámetros óptimos de la red de tuberías para este escenario (ver figura 5.28), se plantea la ecuación en energía para un sistema de bombeo tal como se muestra a continuación:

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} + H_{a,b} = z_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{V_j^2}{2g} + \sum_i^j h_r$$

Figura 5.28: Red de Tuberías para el escenario N°6



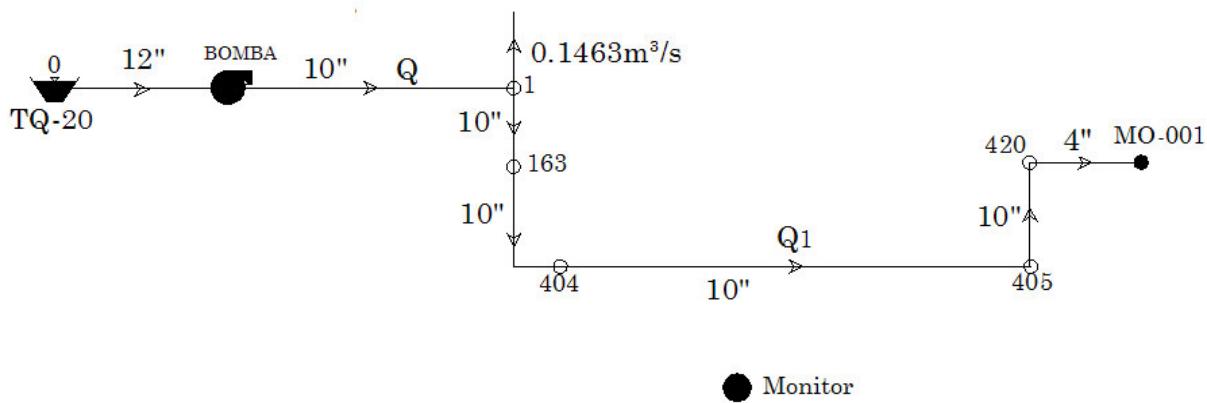
Para fines prácticos, se considera que las tuberías son de diámetro constante y que las perdidas locales son despreciables en comparación con las pérdidas de fricción, por ello la ecuación de energía se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_i - H_j = z_j - z_i + \sum h f_{ij}$$

Además se considera la ecuación de Hazen Williams con $n=1.852$ para determinar las pérdidas por fricción:

$$h f_{ij} = \frac{10.67(l_{ij})Q_{ij}^n}{C_{ij}^{1.852}d_{ij}^{4.871}}$$

Ecuación de energía entre el punto 0 y el MO-001 añadiendo la carga impartida por la bomba y asumiendo diámetros cualesquiera como se muestra en el siguiente esquema:



Datos:

$$K_{mo} = 50 \text{ gpm}/\sqrt{\text{psi}}; n=1.852; z_0=10\text{m}; z_m=1 \text{ m}; g=9.81 \text{ m/s}$$

$$H_{a,b} = A + BQ + CQ^2; A=93.36; B= 0.0016; C=-3 \times 10^{-6} \text{ (Altura de bombeo)}$$

$$z_0 + H_{a,b} = z_m + H_{mo} + (R_1 Q^{1.852} + R_2 Q^{1.852} + R_3 Q_1^{1.852} + R_4 Q_1^{1.852} + R_5 Q_1^{1.852} \\ + R_6 Q_1^{1.852} + R_7 Q_1^{1.852}) \dots \dots \dots \dots \quad (a)$$

Donde:

$$R_1 = \frac{10.67(1.0)}{(120)^{1.852}(0.305)^{4.871}} = 0.49$$

$$R_2 = \frac{10.67(2.0)}{(120)^{1.852}(0.254)^{4.871}} = 2.39$$

$$R_3 = \frac{10.67(3.0)}{(120)^{1.852}(0.254)^{4.871}} = 3.58$$

$$R_4 = \frac{10.67(3.2)}{(120)^{1.852}(0.254)^{4.871}} = 3.82$$

$$R_5 = \frac{10.67(20.50)}{(150)^{1.852}(0.254)^{4.871}} = 16.18$$

$$R_6 = \frac{10.67(3.53)}{(150)^{1.852}(0.254)^{4.871}} = 2.79$$

$$R_7 = \frac{10.67(5.4)}{(150)^{1.852}(0.102)^{4.871}} = 362.70$$

Además, con la ecuación de continuidad en el punto MO-001 se obtiene que:

$$Q_1 = K_{mo} \sqrt{H_{mo}} ; \quad K_{mo} = 50 \frac{gpm}{\sqrt{psi}} = 0.00376 \left(\frac{m^3}{s} / (\sqrt{m}) \right)$$

Asimismo, con la ecuación de continuidad en el nudo 1 se obtiene:

$$Q = Q_1 + 0.1463 m^3/s$$

$$Q_1 = Q - 0.1463 \dots \dots \dots (b)$$

$$\left(\frac{Q - 0.1463}{0.00376} \right)^2 = H_{mo} \dots \dots (c)$$

Se reemplaza las ecuaciones (b) y (c) en ecuación (a) y se obtiene una ecuación con una sola incógnita (Q):

$$\begin{aligned} 10 + 93.36 + 0.0016Q - 3 \times 10^{-6}(Q^2) \\ = 1 + \left(\frac{Q - 0.1463}{0.00376} \right)^2 + 0.49Q^{1.852} + 2.39Q^{1.852} + 3.58(Q - 0.1463)^{1.852} \\ + 3.82(Q - 0.1463)^{1.852} + 16.18(Q - 0.1463)^{1.852} \\ + 2.79(Q - 0.1463)^{1.852} + 362.70(Q - 0.1463)^{1.852} \end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que:

$$Q = 0.1792 \text{ m}^3/\text{s}$$

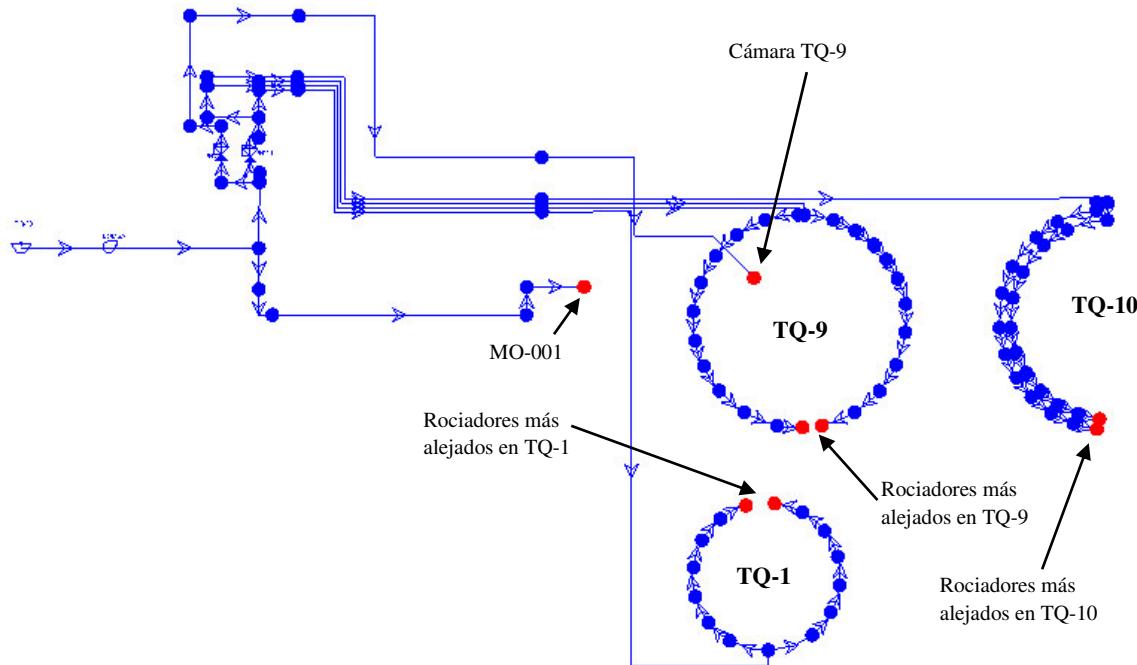
En efecto, la presión (H_{mo}) en el Monitor MO-001, viene dado por:

$$H_{mo} = \left(\frac{Q - 0.1463}{0.00376} \right)^2 = \left(\frac{0.1792 - 0.1463}{0.00376} \right)^2 = 76.56 \text{ m} = 108.89 \text{ psi}$$

La presión obtenida en el monitor supera la presión mínima de 100 psi, por lo tanto los diámetro asumidos son los correctos, sin embargo no necesariamente son los óptimos desde el enfoque económico e hidráulico. Frente a ello, se propone la resolución del problema de la siguiente manera:

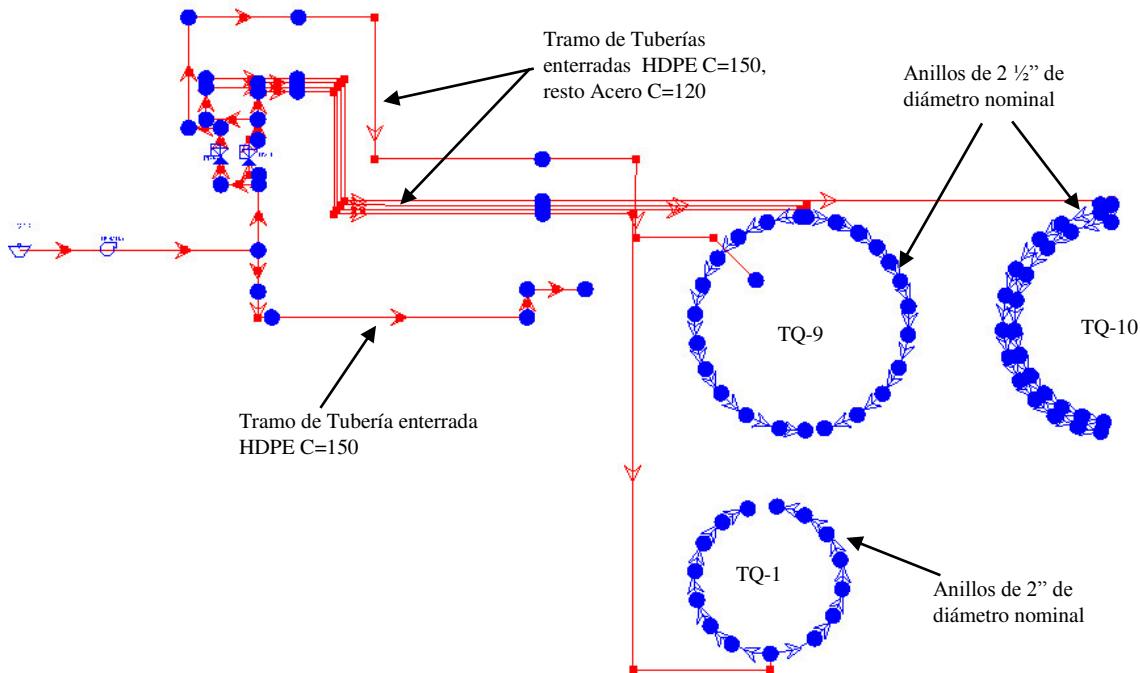
- i. Para el dimensionamiento óptimo de las redes correspondientes se debe considerar las presiones mínimas para el correcto funcionamiento de los dispositivos involucrados para este escenario como; rociadores (TQ-1, TQ-9, TQ-10), cámara de espuma (TQ-9) y monitor (MO-001). Estos dispositivos se muestran en la figura 5.29 mediante nodos de color rojo, a los cuales se les asignará las restricciones de presión dentro del módulo que ofrece WaterCAD (Darwin Designer). Para el nodo correspondiente al MO-001 se ingresa una presión mínima requerida de 100 psi, para la cámara de espuma activada en el tanque TQ-9 se impone una presión mínima requerida de 45.23 psi y una presión de operación máxima de 100 psi. En relación a los rociadores pulverizadores activados se le asigna las presiones mínimas requeridas por el rociador hidráulicamente más desfavorable determinadas en el anexo 1. Es decir, al rociador más alejado del Tanque 1, Tanque 9, Tanque 10 se le impone la presión mínima requerida de 20 psi, 24.77 psi, 32.74 psi respectivamente (Ver figura 5.29) y una presión máxima de 175 psi.

Figura 5.29: Presiones mínimas de operación para escenario 6



- ii. Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.30). Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-1, TQ-9, TQ-10 de 2", 2 ½" y 2 ½" respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a las recomendaciones de la NFPA en función de la cantidad de rociadores en cada anillo.

Figura 5.30: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



- iii. Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 40 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^{40} (más de 10^{40}) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos. Los parámetros del Algoritmo Genético que el

programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.31), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que se muestre las tres mejores soluciones encontradas.

Figura 5.31: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

GA Parameters	
Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	60.0 %
Mutation Probability:	1.5 %
Random Seed:	0.500
Penalty Factor:	1,000,000.000
Stopping Criteria	
Max. Trials:	250000
Non-Improvement Generations:	200
Top Solutions	
Solutions to Keep:	3

- iv. Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará de forma aleatoria los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°6 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

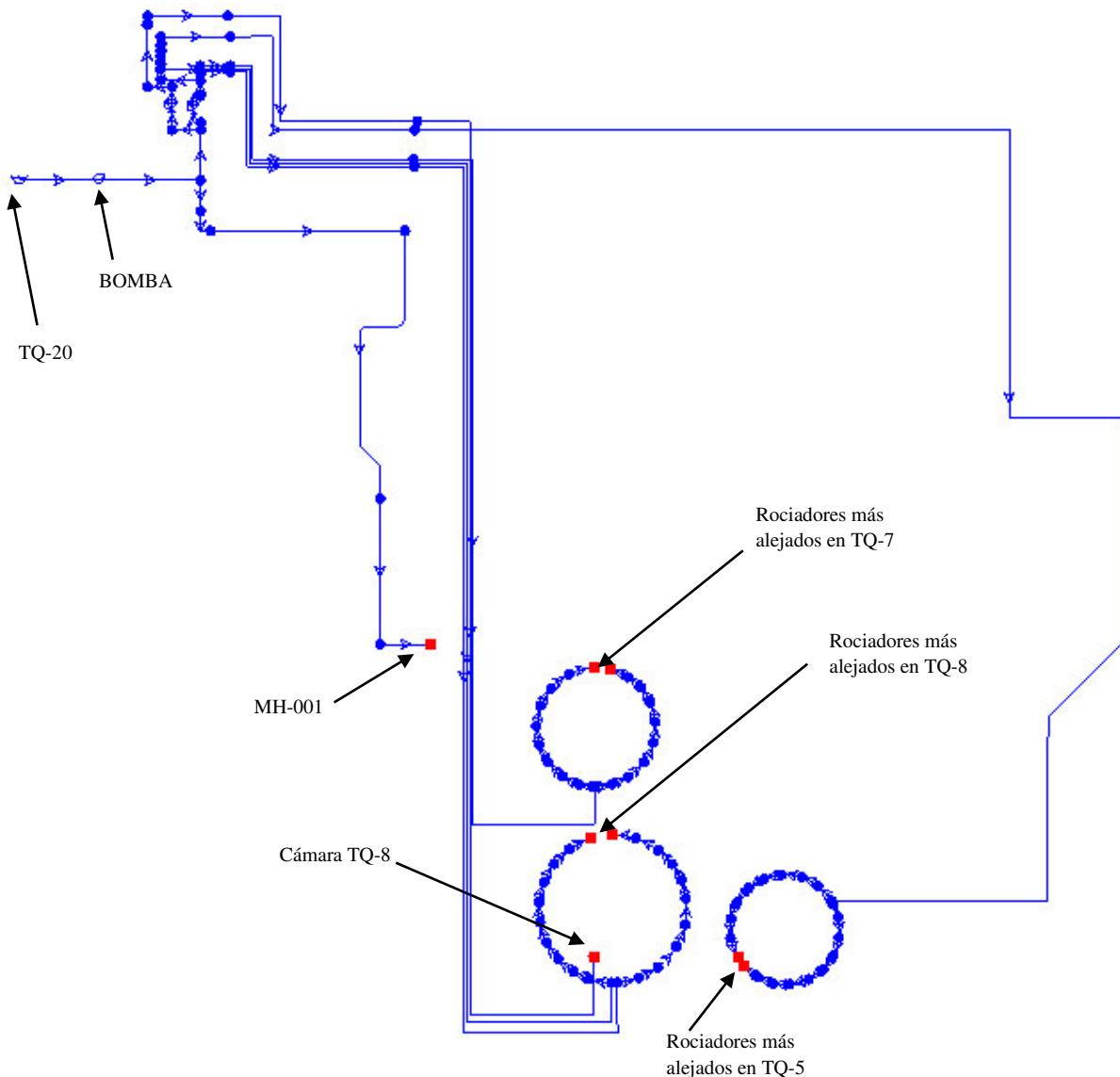
5.10.2 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°5

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas para el correcto funcionamiento de los dispositivos

involucrados para este escenario como; rociadores (TQ-8, TQ-7, TQ-5), cámara de espuma (TQ-8) y monitor (MH-001). Estos dispositivos se muestran en la figura (5.32) mediante nodos de color rojo, a los cuales se les asignará las restricciones de presión.

Para el nodo correspondiente al MH-001 se ingresa una presión mínima requerida de 100 psi, para la cámara de espuma activada en el tanque 8 se impone una presión mínima requerida de 41.13 psi y una presión de operación máxima de 100 psi. En relación a los rociadores pulverizadores activados se le asigna las presiones mínimas requeridas por el rociador hidráulicamente más desfavorable determinadas en el anexo 1. Es decir, al rociador más alejado del Tanque TQ-8, tanque TQ-7, tanque TQ-5 se le impone la presión mínima requerida de 22.77 psi, 20 psi, 20 psi respectivamente (Ver figura 5.32) y una presión máxima de 175 psi, esta última de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.

Figura 5.32: Presiones mínimas de operación para escenario 5

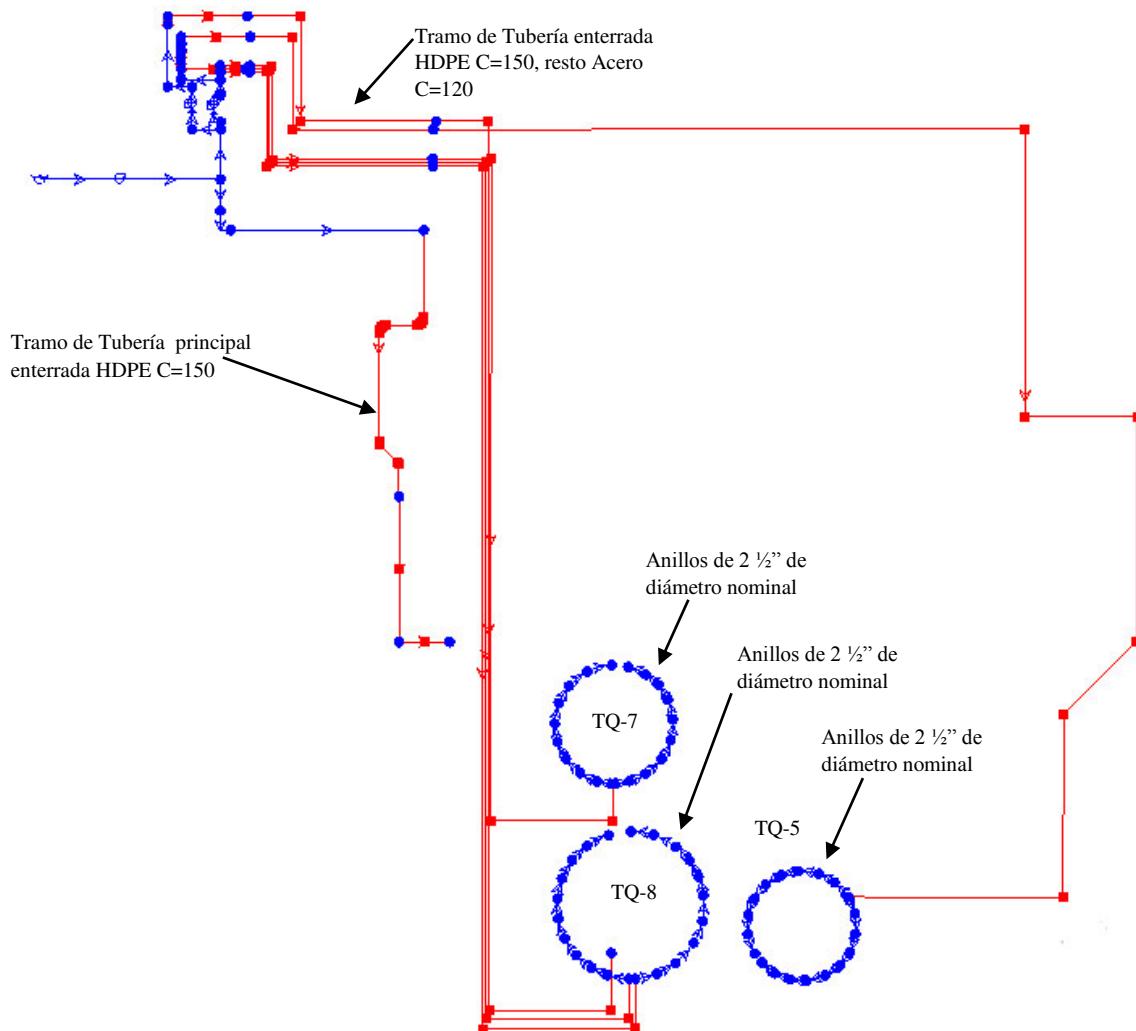


Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.33). En relación a los diámetros óptimos de las tuberías que se muestran de color azul (ver figura 5.33), estas ya fueron determinados en el escenario N° 6, por lo que ya no será necesario buscar los diámetros óptimos de dichas tuberías en este escenario, por el contrario se tendrá una

restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo manteniendo constante los diámetros óptimos de las tuberías de color azul.

Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-8, TQ-7, TQ-5 de $2\frac{1}{2}''$, $2\frac{1}{2}''$ y $2\frac{1}{2}''$ respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

Figura 5.33: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 18 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales

igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^{18} (más de 10^{18}) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos. Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.34), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que se muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.34: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

GA Parameters	
Maximum Era Number:	<input type="text" value="6"/>
Era Generation Number:	<input type="text" value="150"/>
Population Size:	<input type="text" value="50"/>
Cut Probability:	<input type="text" value="1.7"/> %
Splice Probability:	<input type="text" value="60.0"/> %
Mutation Probability:	<input type="text" value="1.5"/> %
Random Seed:	<input type="text" value="0.500"/>
Penalty Factor:	<input type="text" value="1,000,000.000"/>
Stopping Criteria	
Max. Trials:	<input type="text" value="60000"/>
Non-Improvement Generations:	<input type="text" value="200"/>
Top Solutions	
Solutions to Keep:	<input type="text" value="3"/>

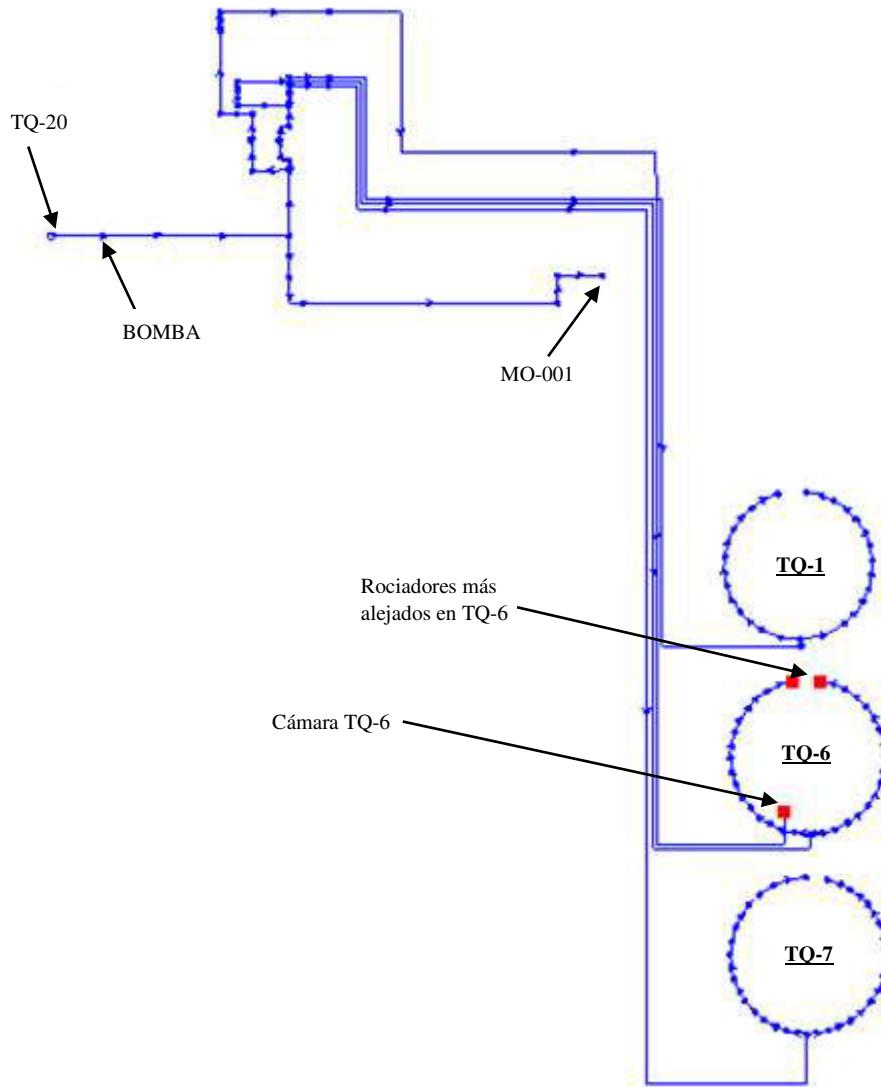
Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°5 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.3 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°3

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas para el correcto funcionamiento de los dispositivos involucrados para este escenario como; rociadores (TQ-6, TQ-7) y la cámara de espuma (TQ-6). Estos dispositivos se muestran en la figura 5.35 mediante nodos de color rojo, a los cuales se les asignará las restricciones de presión.

Para la cámara de espuma activada en el tanque TQ-6 se impone una presión mínima requerida de 41.77 psi y una presión de operación máxima de 100 psi. En relación a los rociadores pulverizadores activados se le asigna las presiones mínimas requeridas por el rociador hidráulicamente más desfavorable determinadas en el anexo 1. Es decir, al rociador más alejado del tanque TQ-6, tanque TQ-7 se le impone la presión mínima requerida de 20 psi, 20 psi respectivamente (Ver figura 5.35) y una presión máxima de 175 psi, esta última de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.

Figura 5.35: Presiones mínimas de operación para escenario 3

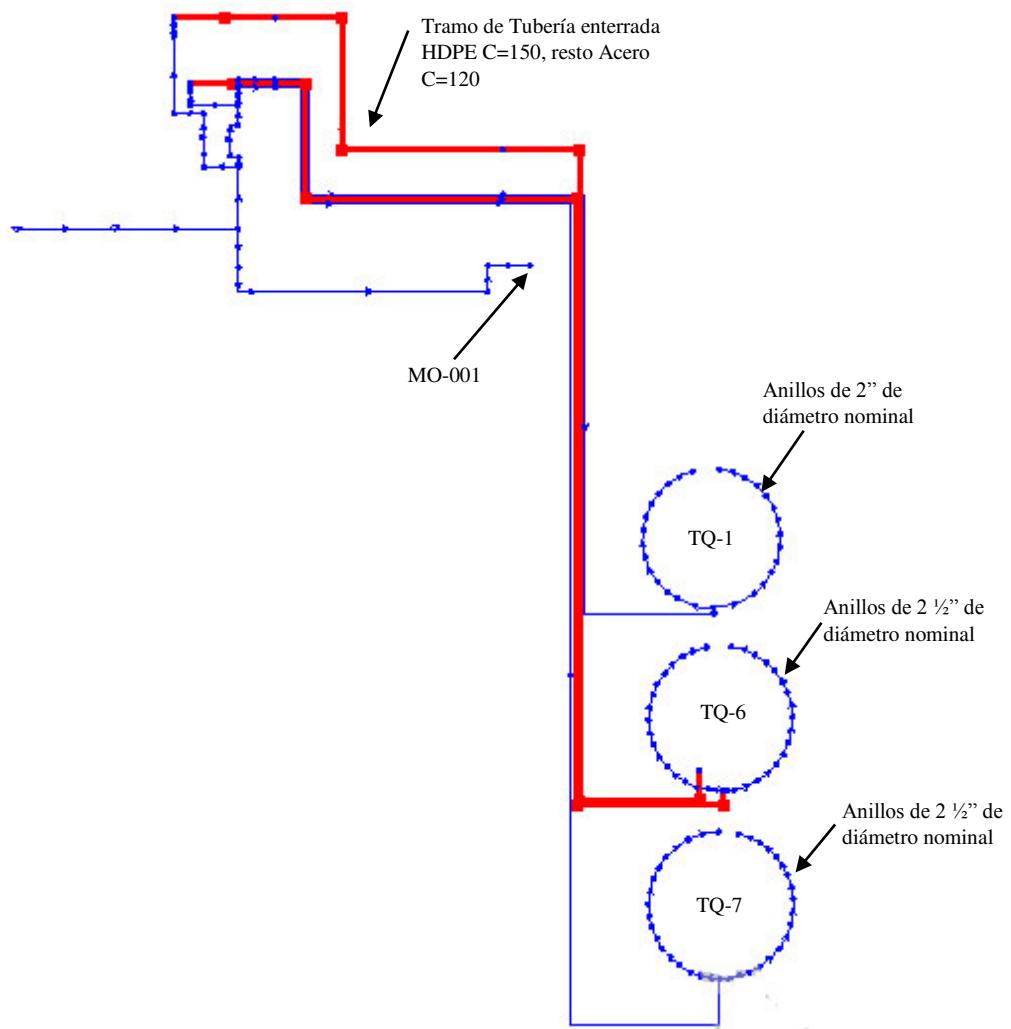


Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.11, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.36). En este escenario ya no es necesario buscar los diámetros óptimos de las tuberías de enfriamiento que abastece los rociadores en el tanque TQ-1 ya que estos fueron obtenidos en el escenario N°6. De igual forma los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen a los rociadores del tanque TQ-7 ya fueron obtenidos en el escenario N°5. Hay que considerar los diámetros

óptimos de la línea que abastece al MO-001 constante para esta simulación, dado que fueron estimados en el escenario N°6. Además, se fijan los diámetros del anillo de acero para el TQ-7, TQ-6, TQ-1 de $2\frac{1}{2}''$, $2\frac{1}{2}''$ y $2''$ respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

De lo anterior, en este escenario solamente se va a determinar los diámetros óptimos de las tuberías de enfriamiento y de espuma correspondiente al tanque TQ-6, es decir las representadas mediante las líneas de color rojo según la figura 5.36.

Figura 5.36: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 6 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^6 (más de 10^6) Esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.37), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.37: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

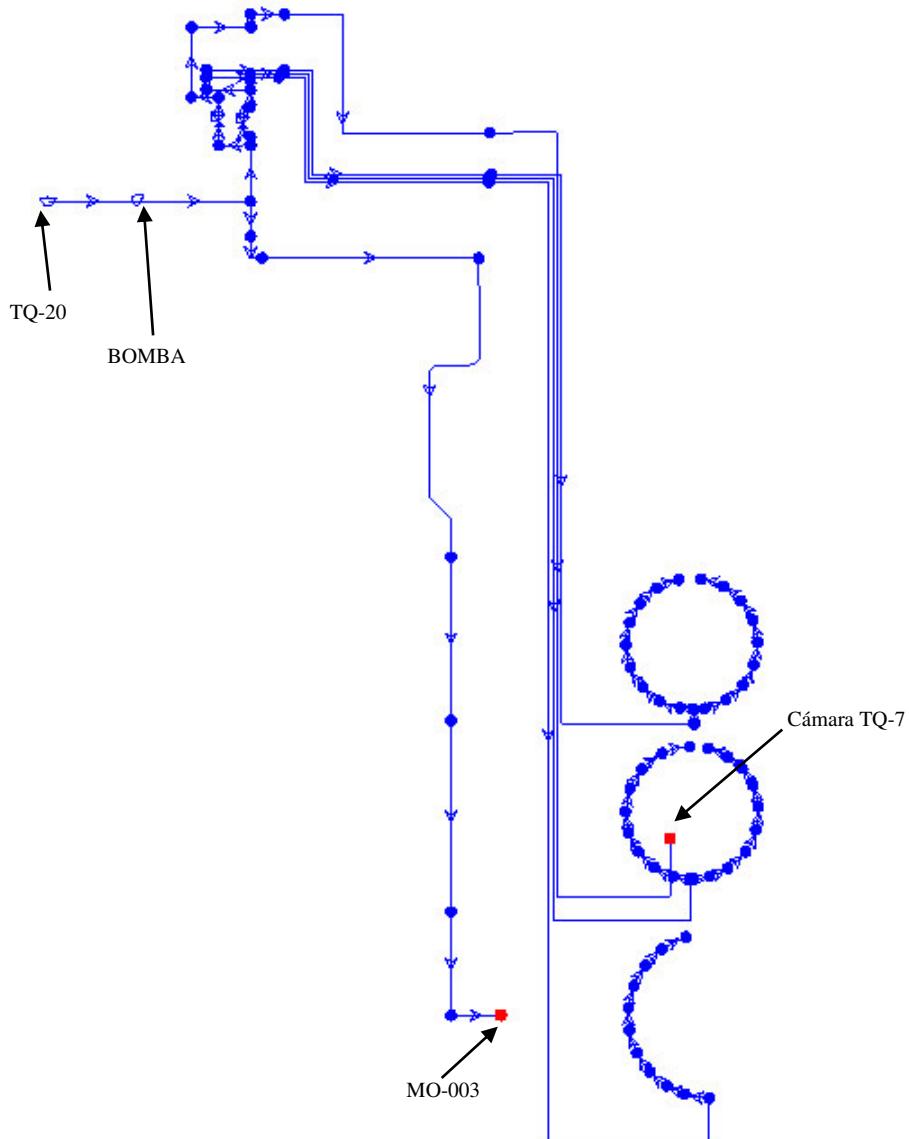
GA Parameters	
Maximum Era Number:	<input type="text" value="6"/>
Era Generation Number:	<input type="text" value="150"/>
Population Size:	<input type="text" value="50"/>
Cut Probability:	<input type="text" value="1.7"/> %
Splice Probability:	<input type="text" value="60.0"/> %
Mutation Probability:	<input type="text" value="1.5"/> %
Random Seed:	<input type="text" value="0.500"/>
Penalty Factor:	<input type="text" value="1,000,000.000"/>
Stopping Criteria	
Max. Trials:	<input type="text" value="50000"/>
Non-Improvement Generations:	<input type="text" value="200"/>
Top Solutions	
Solutions to Keep:	<input type="text" value="3"/>

Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°3 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.4 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 4

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas de restricción en la cámara de espuma del tanque TQ-7 y en el monitor MO-003. Estos dispositivos se muestran en la figura 5.38 mediante nodos de color rojo. Para el nodo correspondiente al MO-003 se ingresa una presión mínima requerida de 100 psi, para la cámara de espuma activada en el tanque TQ-7 se impone una presión mínima requerida de 42.30 psi y una presión de operación máxima de 100 psi.

Figura 5.38: Presiones mínimas de restricción para escenario N°4

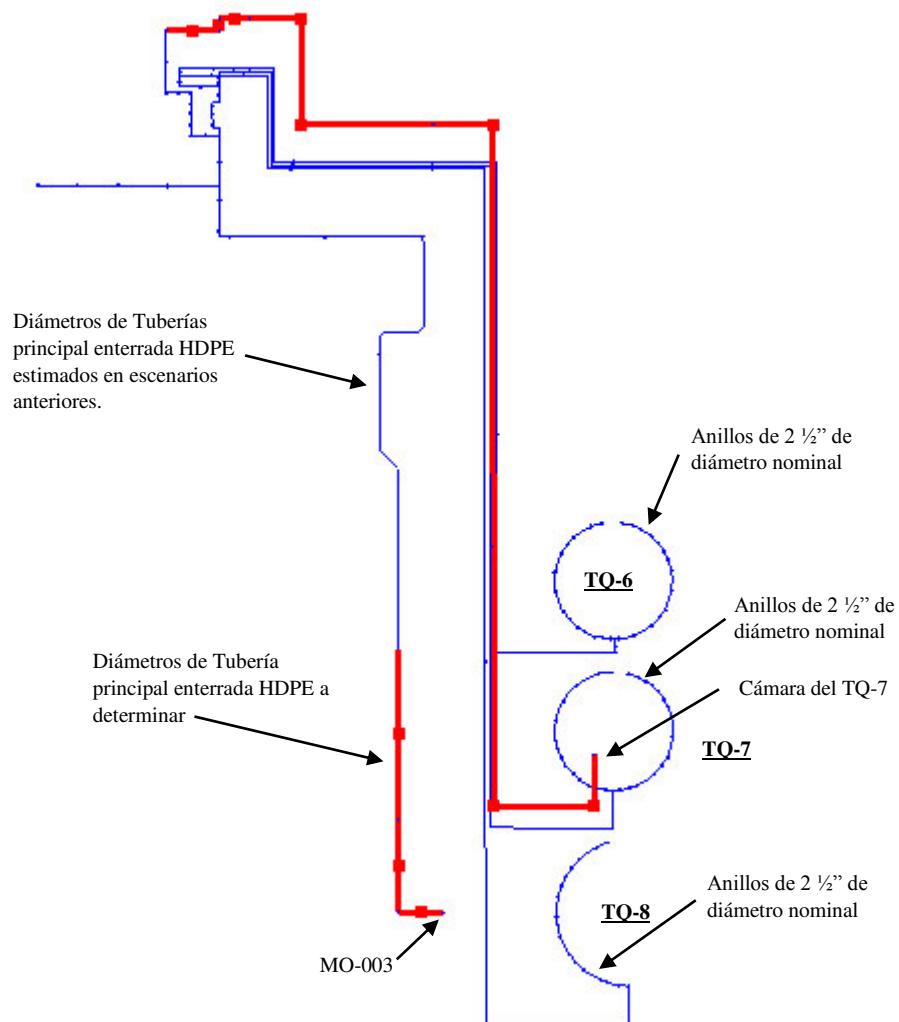


Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.39). Los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-7 y TQ-8 fueron determinados en el escenario N°5, de igual forma los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-6 fueron determinados en el escenario

Nº3, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario, por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo manteniendo constante esos diámetros óptimos de dichas tuberías representados con color azul(Ver figura 5.39). Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-7, TQ-8, TQ-6 de $2 \frac{1}{2}$ ", $2 \frac{1}{2}$ " y $2 \frac{1}{2}$ " respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de espuma al tanque TQ-7 y un tramo de la tubería que abastece de agua al monitor MO-003.

Figura 5.39: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 8 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^8 (más de 10^8) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos. Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (Ver figura 5.40), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que se muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.40: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

The screenshot shows the 'Darwin Designer (Escenario4.wt)' window with the 'Options' tab selected. The 'GA Parameters' section contains the following settings:

Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	60.0 %
Mutation Probability:	1.5 %
Random Seed:	0.500
Penalty Factor:	1,000,000.000

The 'Stopping Criteria' section contains:

Max. Trials:	50000
Non-Improvement Generations:	200

The 'Top Solutions' section contains:

Solutions to Keep:	3
--------------------	---

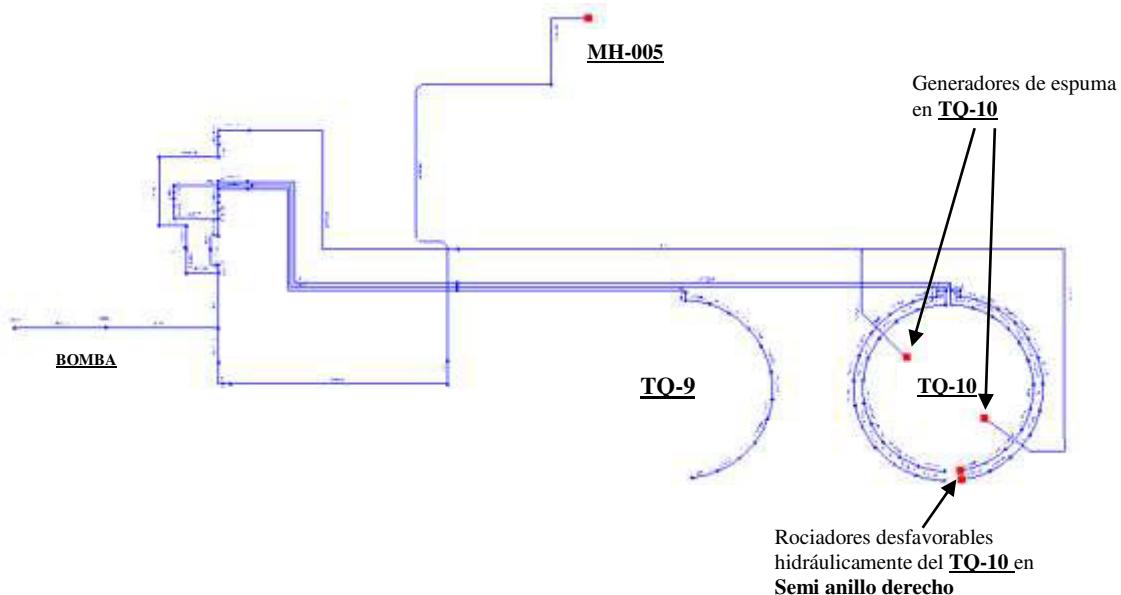
Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente

al escenario N°4 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.5 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°7

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas de restricción en los generadores de espuma del tanque TQ-10, en los rociadores hidráulicamente más desfavorables del semi anillo derecho del TQ-10 y en el monitor hidrante MH-005. Estos dispositivos se muestran en la figura 5.41 mediante nodos de color rojo. Para el nodo correspondiente al monitor hidrante MH-005 se ingresa una presión mínima requerida de 100 psi, para los generadores de espuma activadas en el tanque TQ-10 se impone una presión mínima requerida de 27.62 psi y una presión de operación máxima de 150 psi.

Figura 5.41: Presiones mínimas de restricción para el escenario N°7

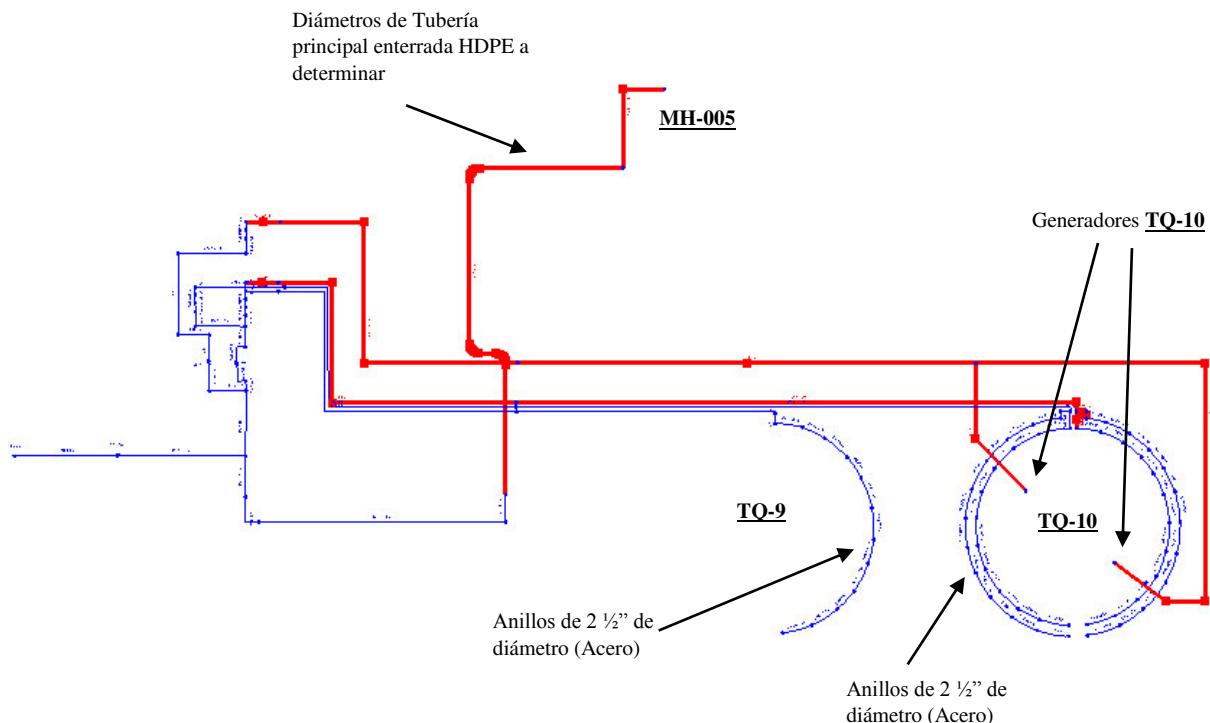


Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.42). Los

diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al semi anillo de la derecha del tanque 9 y al semi anillo de la izquierda del TQ-10 fueron determinados en el escenario N°6, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario, por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo manteniendo constante esos diámetros óptimos de dichas tuberías representados con color azul (Ver 5.42). Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-9, TQ-10 de $2 \frac{1}{2}$ " y $2 \frac{1}{2}$ " respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al semi anillo de la derecha del tanque TQ-10, así como los diámetros de las tuberías que abastecen de agua al MH-005 y los diámetros de las tuberías que abastecen de espuma al tanque TQ-10.

Figura 5.42: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 13 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^{13} (más de 10^{13}) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.43), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.43: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

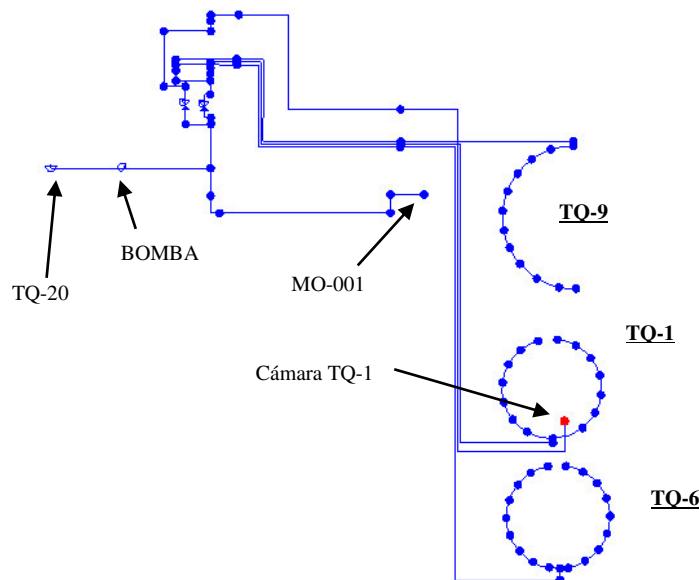


Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°7 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.6 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°1

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar una presión mínima de restricción en la cámara de espuma del tanque TQ-1. Este dispositivo se representa en la figura 5.44 mediante un nodo de color rojo, al cual se le impone una presión mínima requerida de 46.24 psi y una presión de operación máxima de 100 psi.

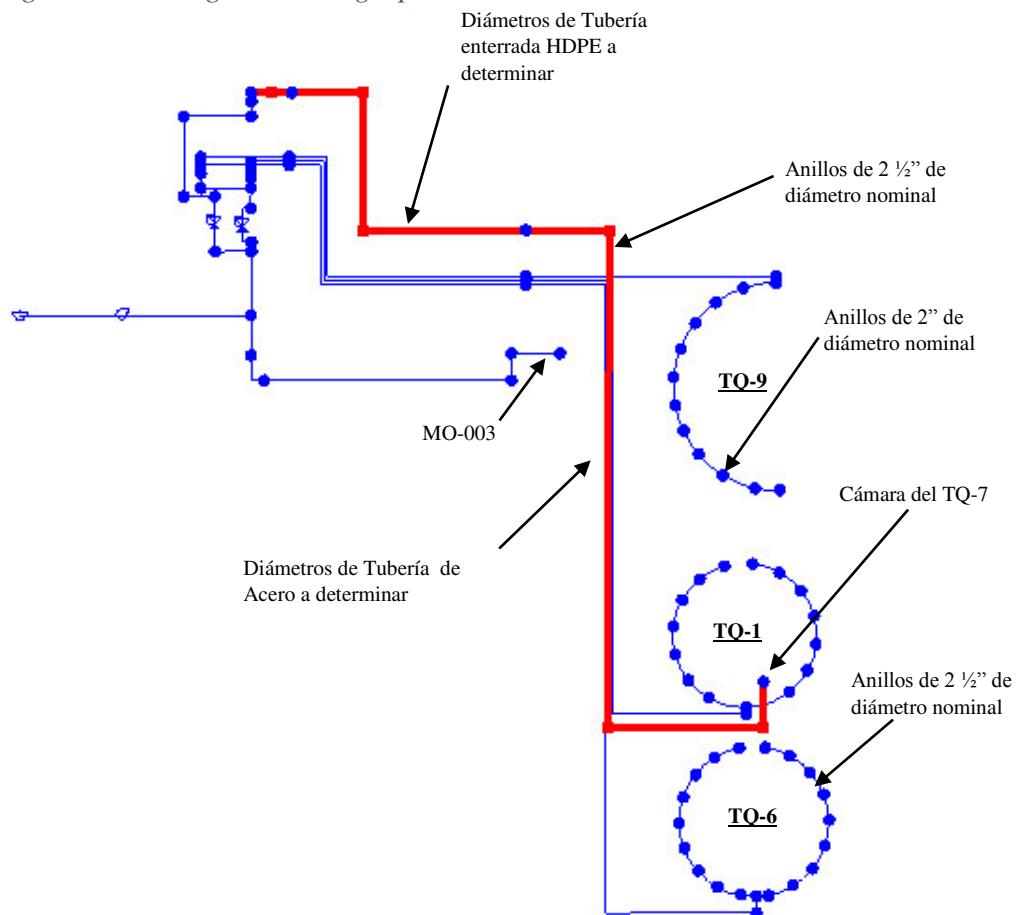
Figura 5.44: Presión mínima de restricción para escenario N°1



Una vez configurada la presión mínima y máxima en los nodo correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.45). Los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-9 y TQ-1 fueron determinados en el escenario N°6, de igual forma los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-6 fueron determinados en el escenario N°3, los diámetros óptimos de las tuberías que alimentan de agua al MO-001 fueron determinados en el escenario N°6, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario,

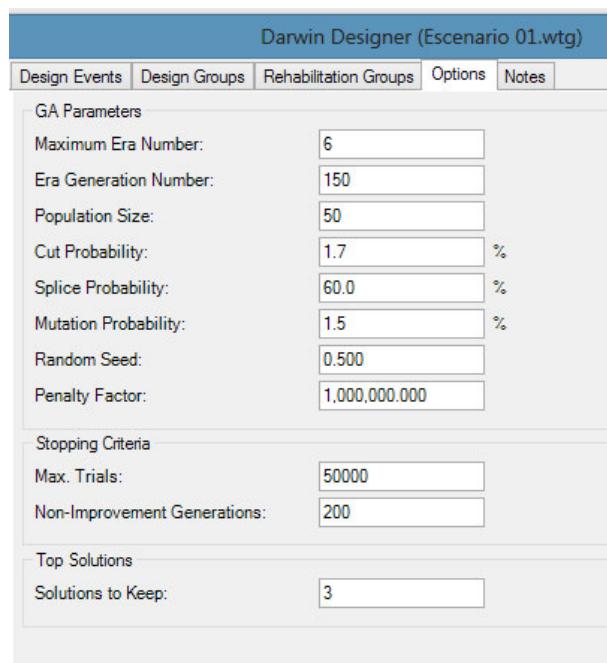
por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo manteniendo constante esos diámetros óptimos de dichas tuberías representados con color azul(Ver figura 5.45). Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-1, TQ-6, TQ-9 de 2", 2 ½" y 2 ½" respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo. En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que alimentan de espuma al tanque TQ-1.

Figura 5.45: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 3 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^3 (más de $10^3 = 1000$) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros de los AG que el programa requiere se deja por defecto (Ver Figura 5.46), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones encontradas.

Figura 5.46: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

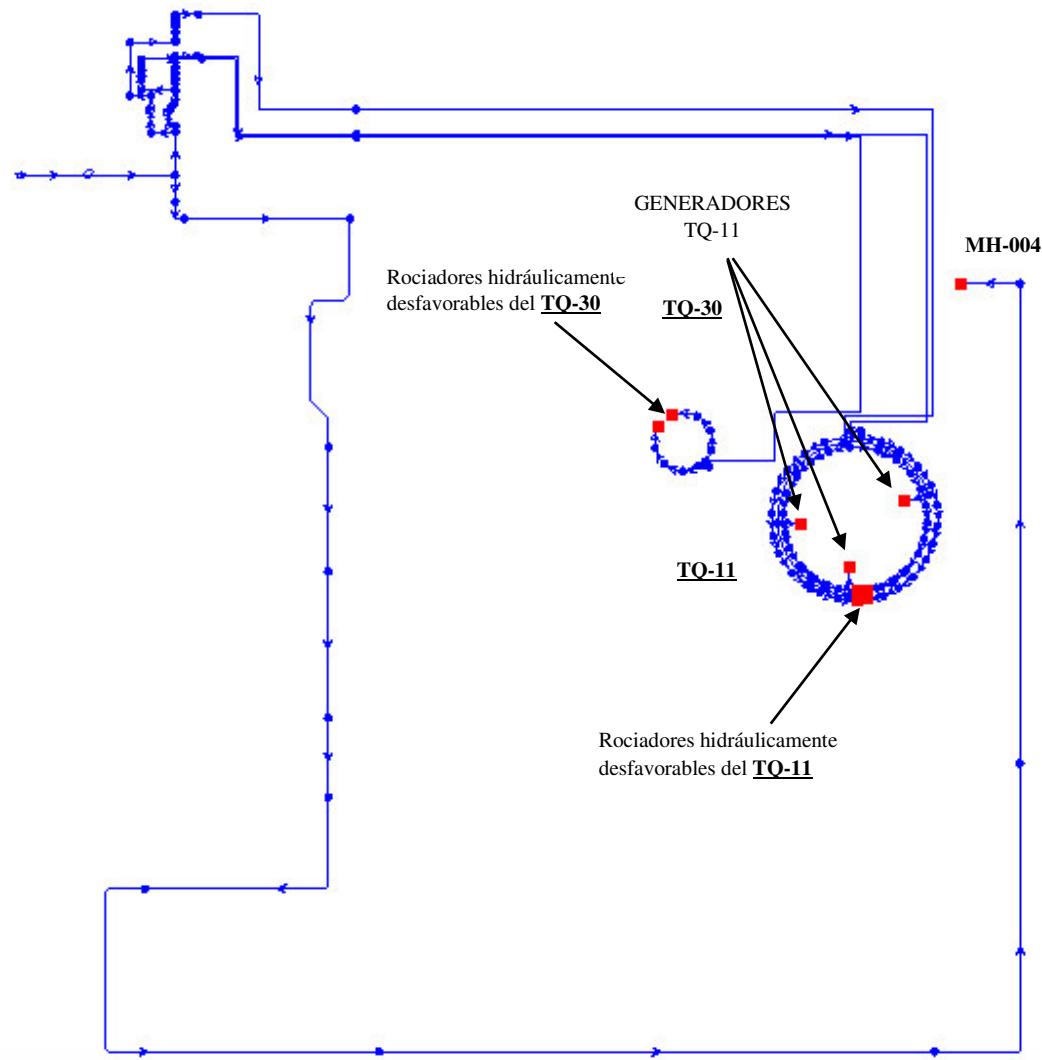


Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°1 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.7 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°8

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas de restricción en los: Generadores del tanque TQ-11, en el monitor MH-004, rociadores hidráulicamente más desfavorables del TQ-11 Y TQ-30. Estos dispositivos se muestran en la figura 5.47 mediante nodos de color rojo. Para el nodo correspondiente a los generadores del TQ-11 se impone una presión mínima requerida de 39.03 psi y una presión máxima de 150 psi, para el monitor hidrante MH-004 se impone una presión mínima requerida de 100 psi, para los rociadores más alejados del TQ-11 y TQ-30 se impone una presión mínima de 30.97 psi y 29.36 psi respectivamente y una máxima presión de 175 psi.

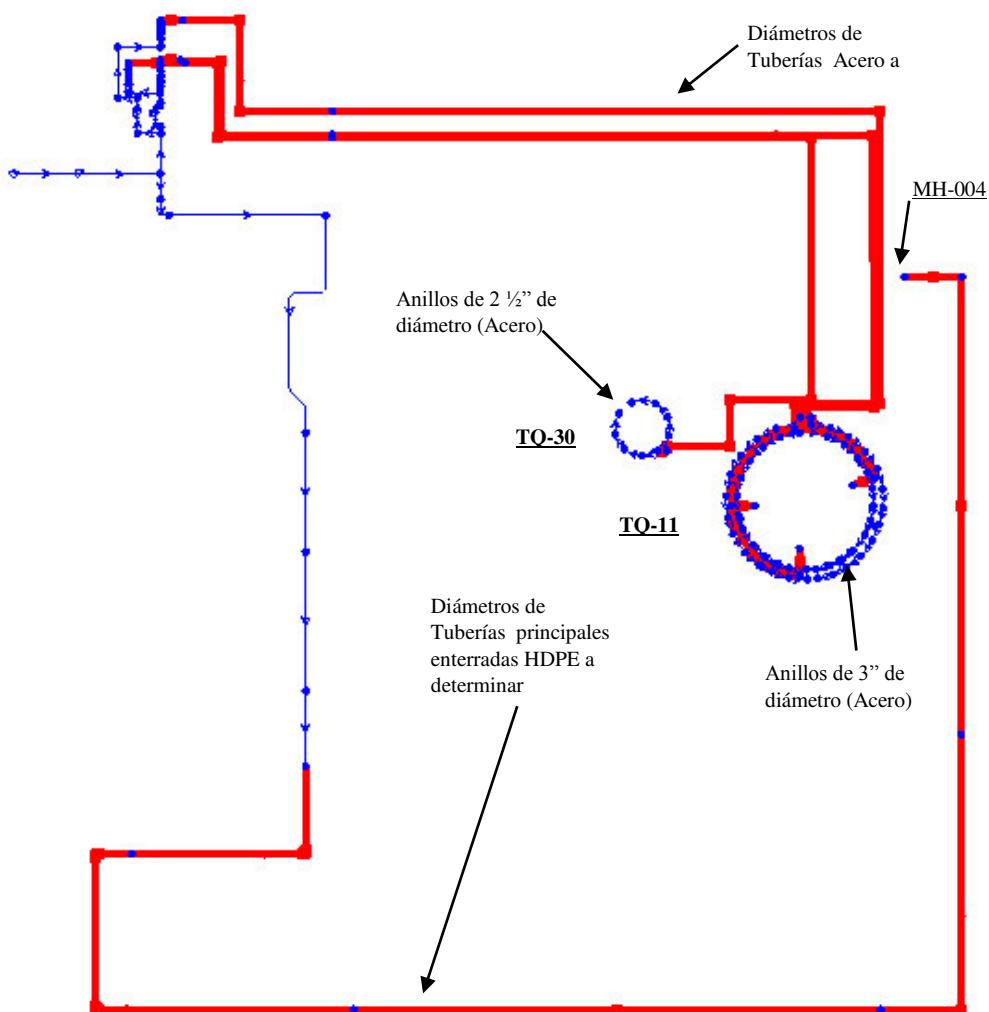
Figura 5.47: Presiones mínimas de restricción para escenario N°8



Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.48), estas serán optimizadas tomando en cuenta los diámetros óptimos de las tuberías representados con color azul (Ver Figura 5.48) determinadas en el escenario N°4 y N°5. Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-11 y TQ-30 de 3" y 2 ½" respectivamente.

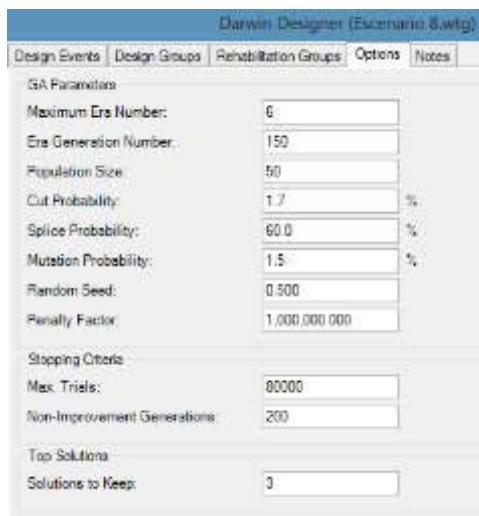
En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de espuma al tanque TQ-11, de las tuberías que alimentan de agua al anillo del tanque TQ-11 y TQ-30, así como el tramo de tuberías que abastece de agua al monitor hidrante MH-004.

Figura 5.48: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 25 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^{25} (más de 10^{25}) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.49), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones encontradas.

Figura 5.49: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

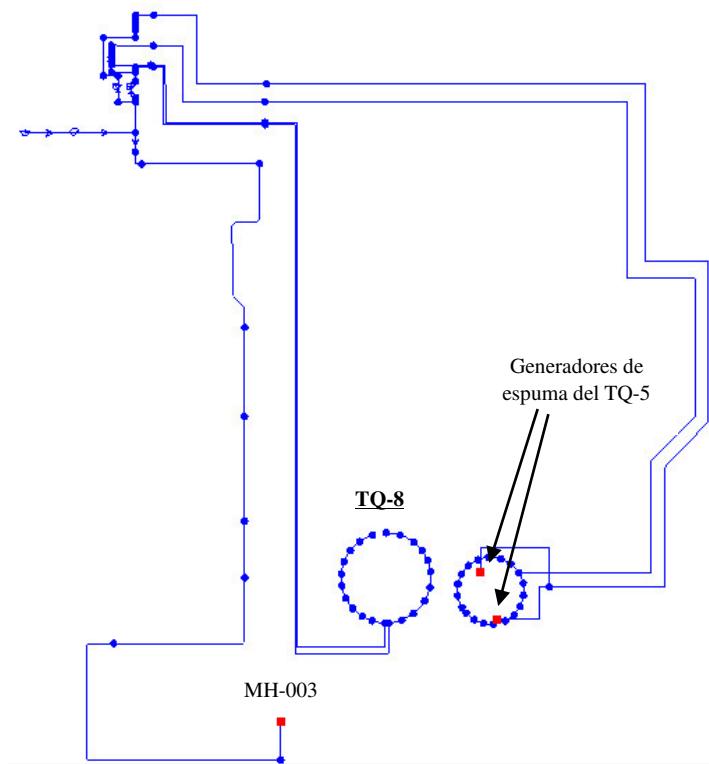


Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°8 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.8 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°2

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas de restricción en los generadores de espuma del tanque TQ-5 y en monitor hidrante MH-003. Estos dispositivos se muestran en la figura 5.50 mediante elemento nodos de color rojo. Para el nodo correspondiente al monitor hidrante MH-003 se fija una presión mínima requerida de 100 psi, para los generadores de espuma activada en el tanque TQ-5 se impone una presión mínima requerida de 20.62 psi y una presión de máxima de 150 psi.

Figura 5.50: Presiones mínimas de restricción para escenario N°2

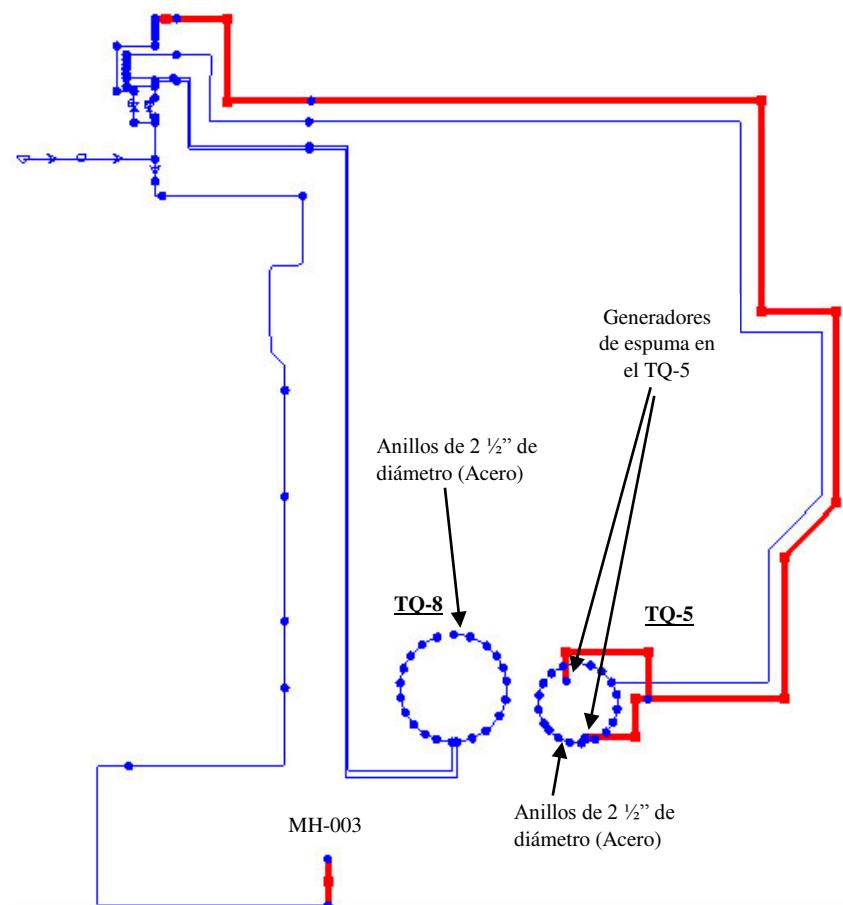


Una vez configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.51). Los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-8 y TQ-5

fueron determinados en el escenario N°5, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario, por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo considerando dichos diámetros óptimos de dichas tuberías representados con elementos líneas de color azul (Ver figura 5.51). Además, se considera constantes los diámetros del anillo para el TQ-8, TQ-5 de $2 \frac{1}{2}''$ y $2 \frac{1}{2}''$ respectivamente, estos diámetros son fijados de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de espuma al generador ubicado en el tanque TQ-5 y un tramo de la tubería que abastece de agua al Monitor Hidrante MH-003.

Figura 5.51: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 6 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^6 (más de 10^6 =un millón) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.52), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.52: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación

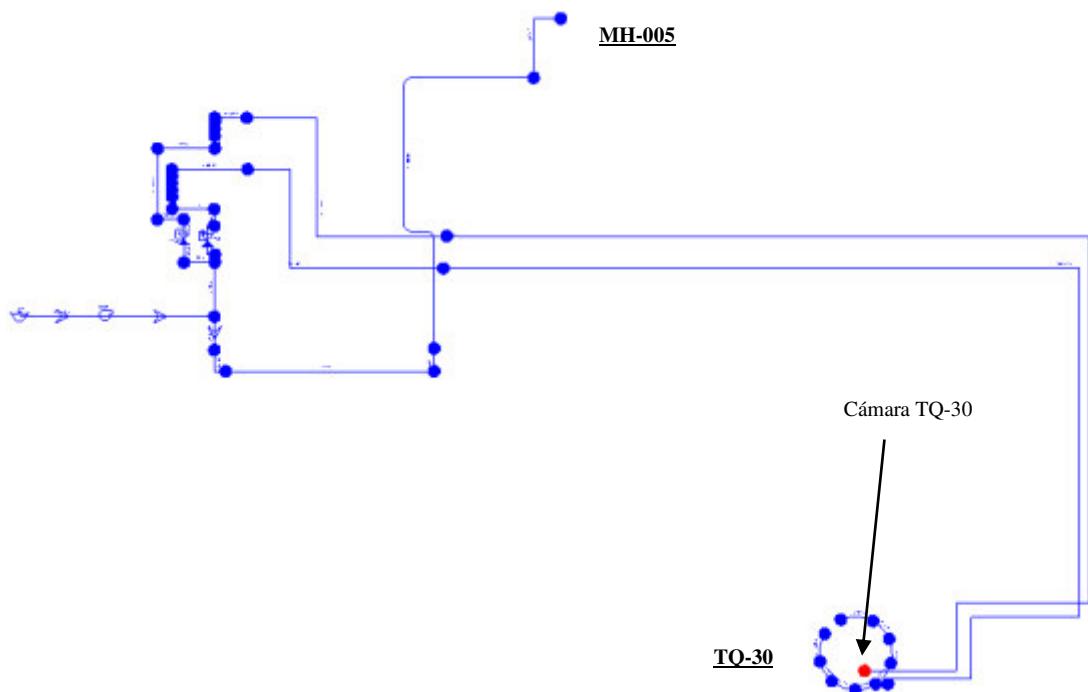


Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°2 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.9 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N°9

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar una presión mínima de restricción en la cámara de espuma del tanque TQ-30. Este dispositivo se muestra en la figura 5.53 mediante un elemento nodo de color rojo, al cual se le impone una presión mínima requerida de 6.07 psi y una máxima de 100 psi.

Figura 5.53: Presión mínima de restricción para escenario N°9

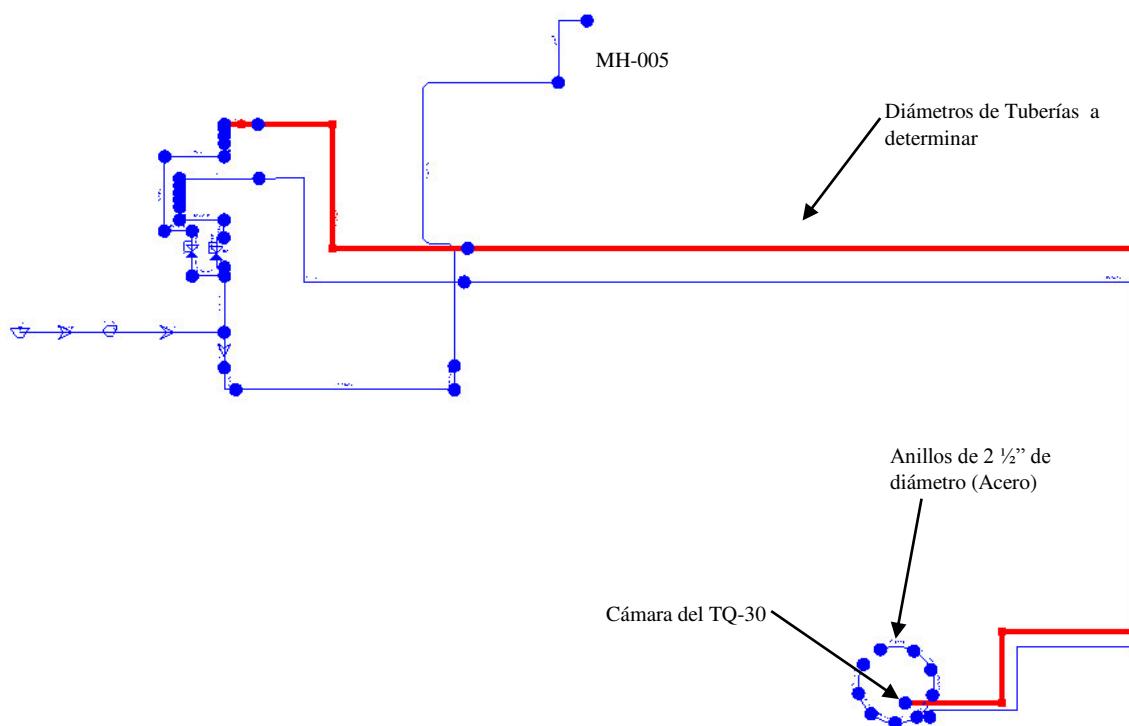


Una vez configurada las presión mínima y máxima en el nodo correspondiente, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero o del tipo Hdpe descritas en la tabla 5.11 y 5.12, a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.54). Los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al anillo del tanque TQ-30 fueron determinados en el escenario N°8, de igual forma los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de agua al Monitor Hidrante MH-005 fueron determinados en el escenario N°10, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario, por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo

considerando los diámetros óptimos de dichas tuberías representados mediante elementos líneas de color azul(Ver Figura 5.54). Además, se considera constantes el diámetro del anillo para el TQ-30 de $2 \frac{1}{2}$ ", este diámetro es fijado de acuerdo a la NFPA según la cantidad de rociadores en cada anillo.

En efecto, solamente faltaría determinar los diámetros óptimos de las tuberías que abastecen de espuma al tanque TQ-30.

Figura 5.54: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 3 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 17^3 (más de 10^3) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la

prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (ver figura 5.55), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.55: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación



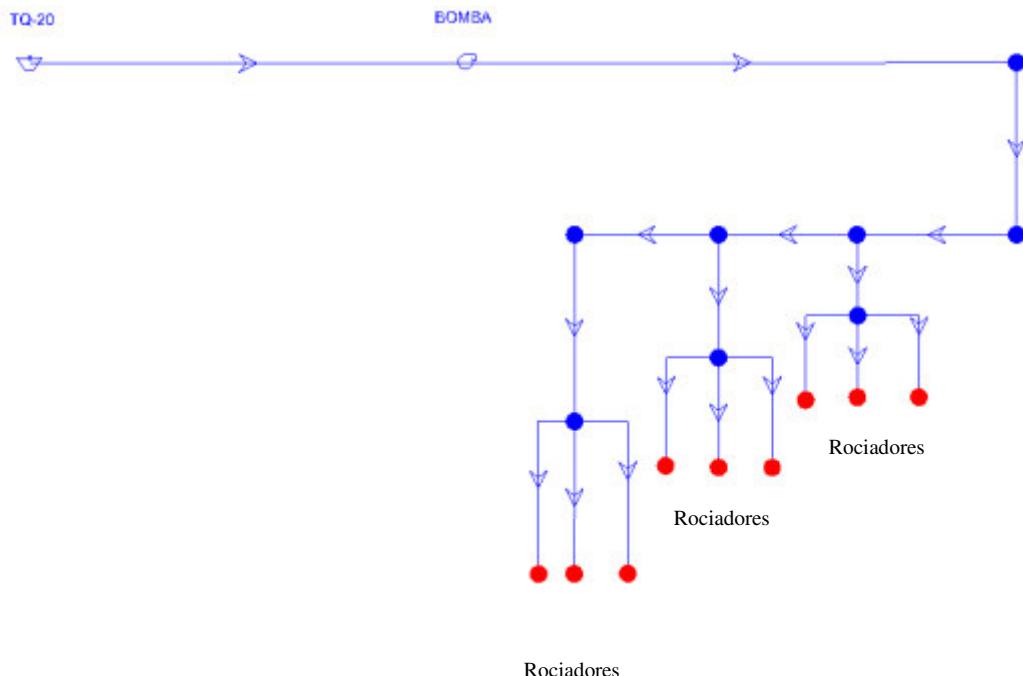
Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°9 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

5.10.10 Estimación de diámetros óptimos en el escenario N° 10

Para la optimización de las redes de tuberías correspondientes a este escenario implica considerar presiones mínimas de restricción en los rociadores automáticos del cuarto de bomba. Estos dispositivos se muestran en la figura 5.56 mediante nodos de color rojo, a los

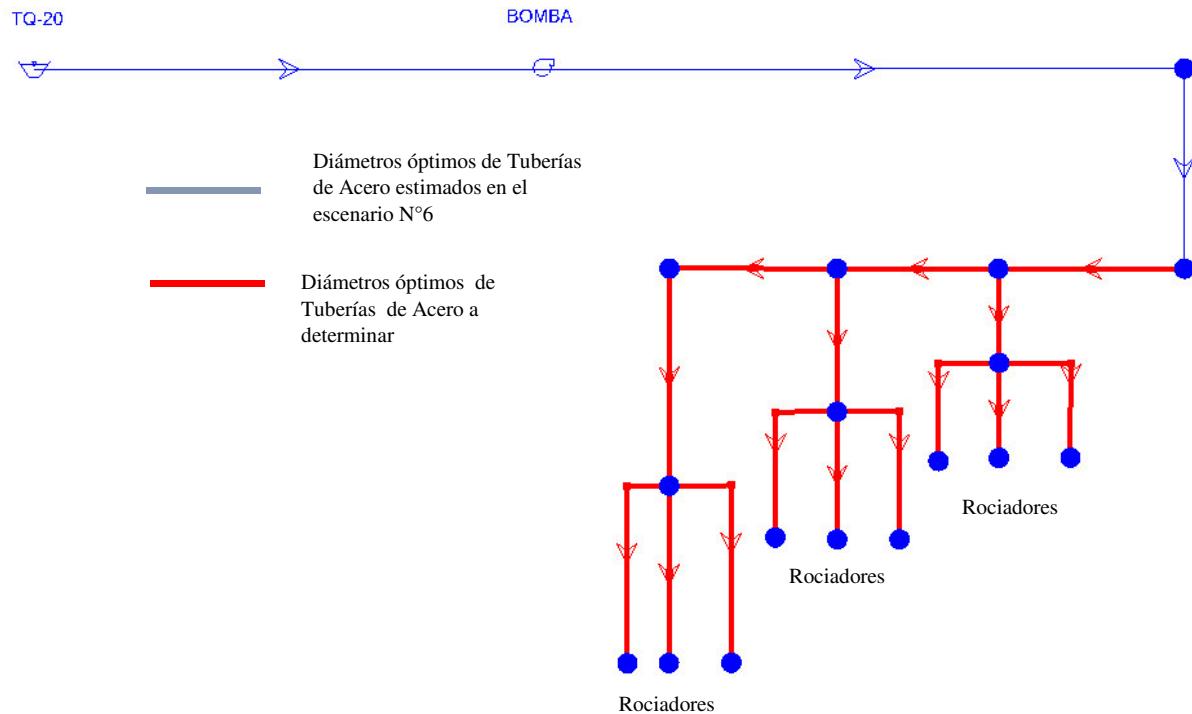
cuales se les impone una presión mínima requerida de 31.51 psi y una presión máxima de 175 psi.

Figura 5.56: Presiones mínimas de restricción para escenario 16



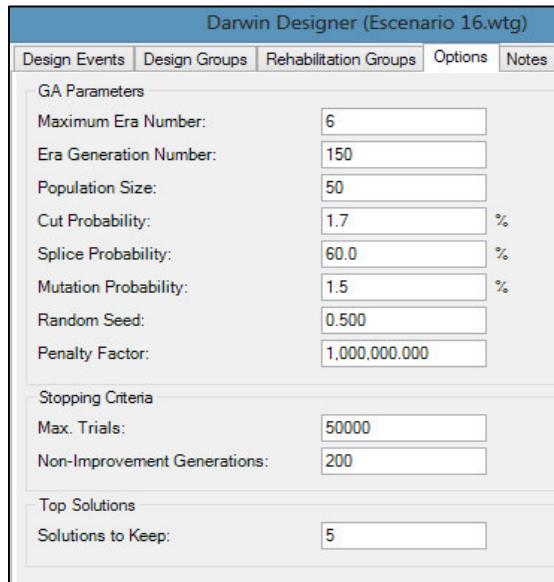
Luego de haber configurada las presiones mínimas y máximas en los nodos correspondientes, se le asigna el grupo de diámetros comerciales de acero a cada tubería representada mediante el color rojo (Ver figura 5.57). Asimismo, los diámetros óptimos de las tuberías representadas mediante el elemento línea de color azul fueron determinados en el escenario N°6, por lo que ya no será necesario estimar estos diámetros en este escenario, por el contrario, se tendrá una restricción adicional, es decir, optimizar las redes de tuberías de color rojo considerando dichos diámetros.

Figura 5.57: Asignación de grupos de diámetros a la red de tuberías



Para este escenario; la red señalada de color rojo en la figura anterior está conformada por 15 tuberías a optimizar, además con el tamaño del conjunto de diámetros comerciales igual a 17, el número de soluciones para dicha red es de 1715 (más de 1015) esta cantidad es el total de posibles soluciones entre aquellos que cumplen y no cumplen con las restricciones a la que están sujetas, sin embargo, las soluciones que si cumplen con estas restricciones sigue siendo alto. Esto evidentemente descarta la búsqueda manual exhaustiva de diámetros mediante la prueba y error hasta encontrar una solución que satisfaga los requerimientos hidráulicos. Es por ello que, para dar solución al problema se hace uso de la metodología computacional de optimización basado en Algoritmos genéticos (AG). Los parámetros del Algoritmo Genético que el programa requiere se deja por defecto (Ver figura 5.58), sin embargo para poder comparar los resultados, en la casilla “Solutions to keep” se ingresa el valor de 3, esto con el fin de que muestre las tres mejores soluciones.

Figura 5.58: Parámetros de Algoritmo Genético (AG) para la simulación



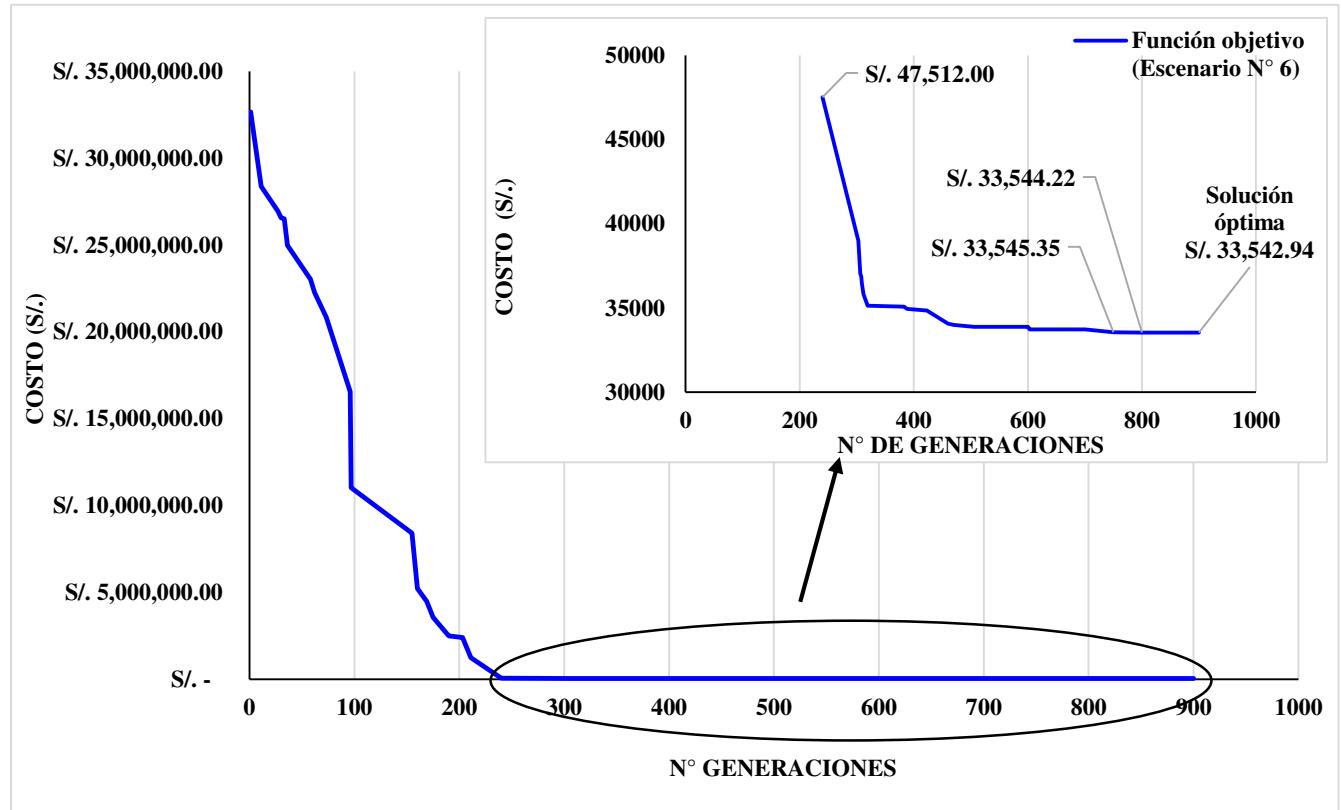
Luego de haber introducido toda la información anterior, el programa determinará y dimensionará automáticamente los diámetros de todas las tuberías de la red correspondiente al escenario N°16 considerando la función objetivo de mínimo costo. Los resultados se mostrarán en el capítulo 6.

CAPITULO VI: RESULTADOS

En este capítulo se analizarán, discutirán y se mostrarán los resultados en el mismo orden en el que se realizó la estimación de los diámetros óptimos, luego de las simulaciones realizadas para los diez escenarios de incendio en los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos dentro del Terminal Juliaca.

6.1 Escenario N°6: Incendio en tanque TQ-9

Figura 6.1: Evolución de AG para el escenario N°6



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos, en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio, nótese que la curva inicia con costos elevados, esto es debido a que la solución encontrada

está muy alejado de satisfacer las restricciones hidráulicas impuestas, por lo que se ha castigado a estas malas soluciones con un factor de penalidad igual a $\lambda = 1000000$. De la misma grafica se obtiene que luego de las 750 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.33,545.35 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 800 sigue resultando un costo similar de S/. 33,544.22 soles, de igual forma hasta la generación 900 se obtiene un costo semejante de S/.33,542.94 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación aumenta, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.33,542.94 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.1 se observa que la única diferencia entre las tres mejores soluciones es para la tubería P-295, esta tubería de acero podría tomar un diámetro nominal de 2", 2 ½" o de 3" ya que según la Tabla 6.2 con cualquiera de estos tres diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.1: Tres mejores Soluciones de la red de tuberías en el escenario 6

Tubería	Material	Hazen-Williams C	Mejor Solución 1		Mejor Solución 2		Mejor Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-1	Acero	120	10.02	246.81	10.02	246.81	10.02	246.81
P-2	Acero	120	7.981	354.06	7.981	354.06	7.981	354.06
P-3	Acero	120	7.981	1,416.24	7.981	1,416.24	7.981	1,416.24
P-4	Acero	120	7.981	531.09	7.981	531.09	7.981	531.09
P-5	Acero	120	6.065	176.53	6.065	176.53	6.065	176.53
P-6	Acero	120	6.065	176.53	6.065	176.53	6.065	176.53
P-7	Acero	120	7.981	354.06	7.981	354.06	7.981	354.06
P-29	Acero	120	7.981	88.51	7.981	88.51	7.981	88.51
P-78	Hdpe	150	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10
P-98	Hdpe	150	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10
P-195	Acero	120	7.981	531.09	7.981	531.09	7.981	531.09
P-198	Acero	120	5.047	374.4	5.047	374.4	5.047	374.4
P-202	Acero	120	7.981	88.51	7.981	88.51	7.981	88.51

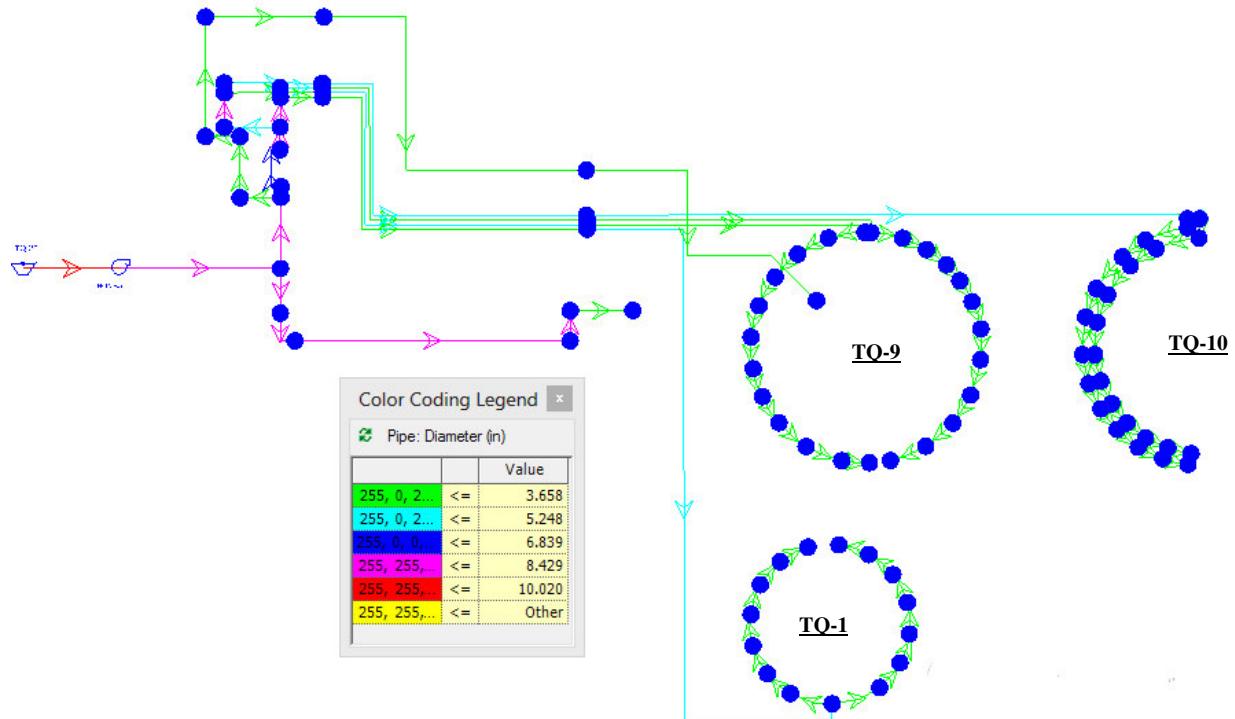
P-207	Acero	120	3.548	369.32	3.548	369.32	3.548	369.32
P-208	Acero	120	5.047	524.16	5.047	524.16	5.047	524.16
P-213	Hdpe	150	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74
P-214	Hdpe	150	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74
P-293	Acero	120	5.047	3,744.00	5.047	3,744.00	5.047	3,744.00
P-294	Acero	120	4.026	270.99	4.026	270.99	4.026	270.99
P-295	Acero	120	2.067	2.39	2.469	3.67	3.068	4.8
P-296	Acero	120	2.067	23.86	2.067	23.86	2.067	23.86
P-361	Acero	120	2.469	421.71	2.469	421.71	2.469	421.71
P-362	Acero	120	2.067	35.79	2.067	35.79	2.067	35.79
P-363	Acero	120	2.067	35.79	2.067	35.79	2.067	35.79
P-364	Acero	120	2.067	41.76	2.067	41.76	2.067	41.76
P-365	Acero	120	2.469	326.36	2.469	326.36	2.469	326.36
P-374	Hdpe	150	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66
P-426	Acero	120	7.981	566.5	7.981	566.5	7.981	566.5
P-427	Hdpe	150	6.963	2,315.27	6.963	2,315.27	6.963	2,315.27
P-457	Hdpe	150	6.963	398.68	6.963	398.68	6.963	398.68
P-464	Acero	120	4.026	691.93	4.026	691.93	4.026	691.93
P-465	Acero	120	3.548	505.18	3.548	505.18	3.548	505.18
P-474	Hdpe	150	3.633	198.61	3.633	198.61	3.633	198.61
P-476	Acero	120	2.469	293.36	2.469	293.36	2.469	293.36
P-477	Acero	120	7.981	842.66	7.981	842.66	7.981	842.66
P-478	Acero	120	7.981	477.98	7.981	477.98	7.981	477.98
P-479	Acero	120	3.068	1,307.18	3.068	1,307.18	3.068	1,307.18
P-482	Acero	120	3.548	1,863.09	3.548	1,863.09	3.548	1,863.09
P-483	Acero	120	3.548	1,863.09	3.548	1,863.09	3.548	1,863.09
P-485	Acero	120	5.047	5,073.12	5.047	5,073.12	5.047	5,073.12
COSTO TOTAL				S/. 33,542.94		S/. 33,544.22		S/. 33,545,35

Tabla 6.2: Resultados de simulación para el escenario 6

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
MO-001	100.00	175	106.89	0	106.88	0	106.88	0
J-85	20.00	175	30.25	0	30.25	0	30.25	0
J-77	20.00	175	30.25	0	30.25	0	30.25	0
J-282	24.77	175	32.20	0	32.20	0	32.20	0
J-100	24.77	175	30.34	0	30.34	0	30.34	0
J-312	32.75	175	43.71	0	43.7	0	43.69	0
J-299	32.75	175	42.78	0	42.88	0	42.92	0
CAMARA(TQ-9)	45.23	100	58.81	0	58.81	0	58.81	0

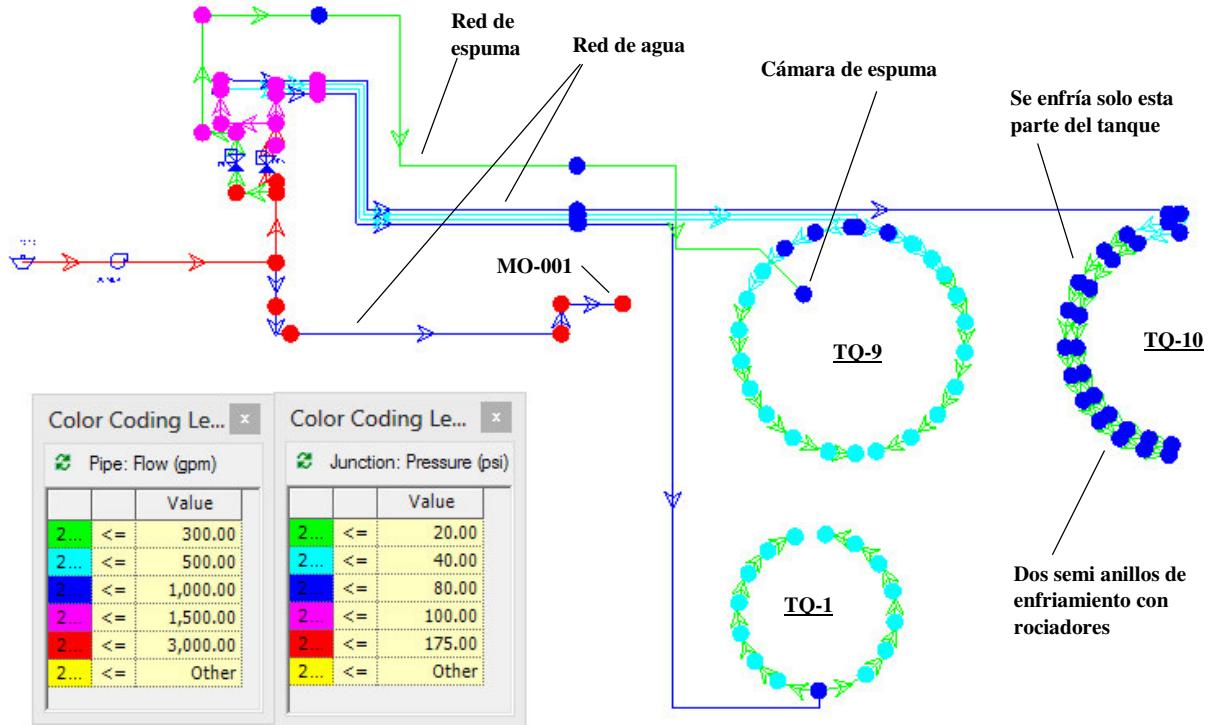
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°6 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.2):

Figura 6.2: Solución óptima para el escenario 6



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados gráficos de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-9) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. En caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.3).

Figura 6.3: Simulación optimizada para el escenario 6



En este caso los resultados fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma se comporta alrededor de 58.81 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 45.23 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 184.04 gpm resultando mayor al caudal teórico de 161.46gpm. Los rociadores del tanque TQ-9 trabajan con presiones superiores a 24.77 psi y menores a 175 psi, el caudal real que ingresa a la sección izquierda y derecha del anillo activado en el tanque TQ-9 es de 473.15gpm y 459.40gpm respectivamente, estos valores resultan superiores al caudal teórico requerido de 394.47gpm. Además podemos observar que la presión en el MO-001 supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite supera los 500 gpm (teórico).

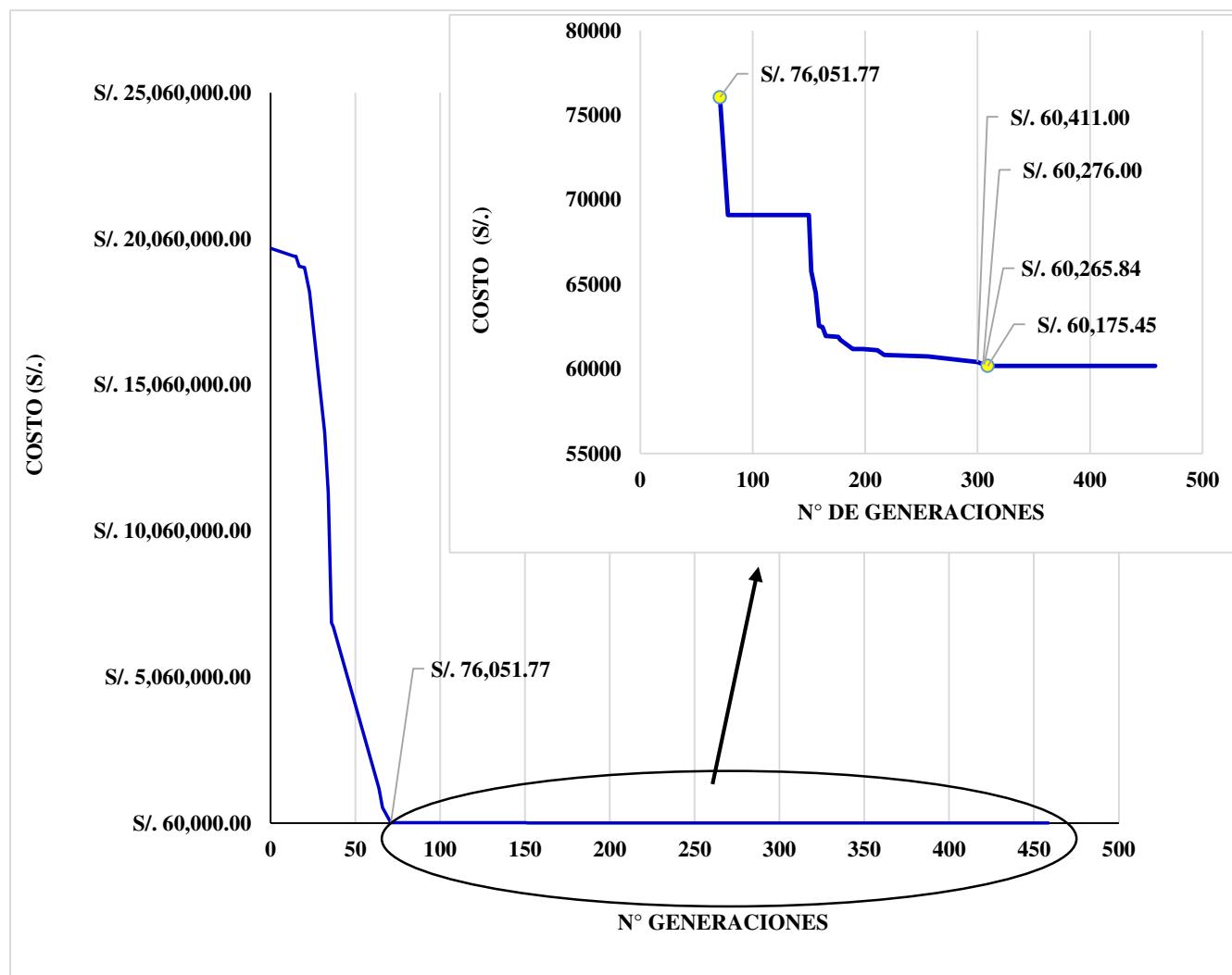
Los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-1 trabajan a presiones, entre 20psi y 175psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-1

es igual a 580.30 gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 396.77gpm y los rociadores que enfrian las paredes del tanque TQ-10 trabajan a presiones, entre 32.75psi y 175psi, el caudal real simulado que ingresa al semi anillo activado de la izquierda superior e inferior del TQ-10 es de 302.50gpm y 305.78gpm respectivamente, los cuales superan al caudal teórico de 258.10gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.2 Escenario N°5: Incendio en tanque TQ-8

Figura 6.4: Evolución de AG para el escenario N°5



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio, nótese que la curva inicia con costos elevados, esto es debido a que la solución encontrada está muy alejado de satisfacer las restricciones hidráulicas impuestas, por lo que se ha castigado a estas malas soluciones con un factor de penalidad igual a $\lambda = 1000000$. De la misma grafica se obtiene que luego de las 300 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.60,265.84 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 308 sigue resultando un costo similar de S/. 60,200.49 soles y desde la generación 309 en adelante se obtiene un costo de S/.60,175.45 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación aumenta, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.33,542.94 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, de la comparación de los resultados que se muestran en la Tabla 6.3 se puede apreciar que la tubería de acero P-417 puede tomar un diámetro nominal de 4" (solucion1), 5" (solución 2) o 4" (solución 3) y la tubería de acero P-654 puede tomar un diámetro nominal de 2 ½" (solución 1), 2 ½" (solución 2) o 3" (solución 3) ya que según la Tabla 6.4 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.3: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 5

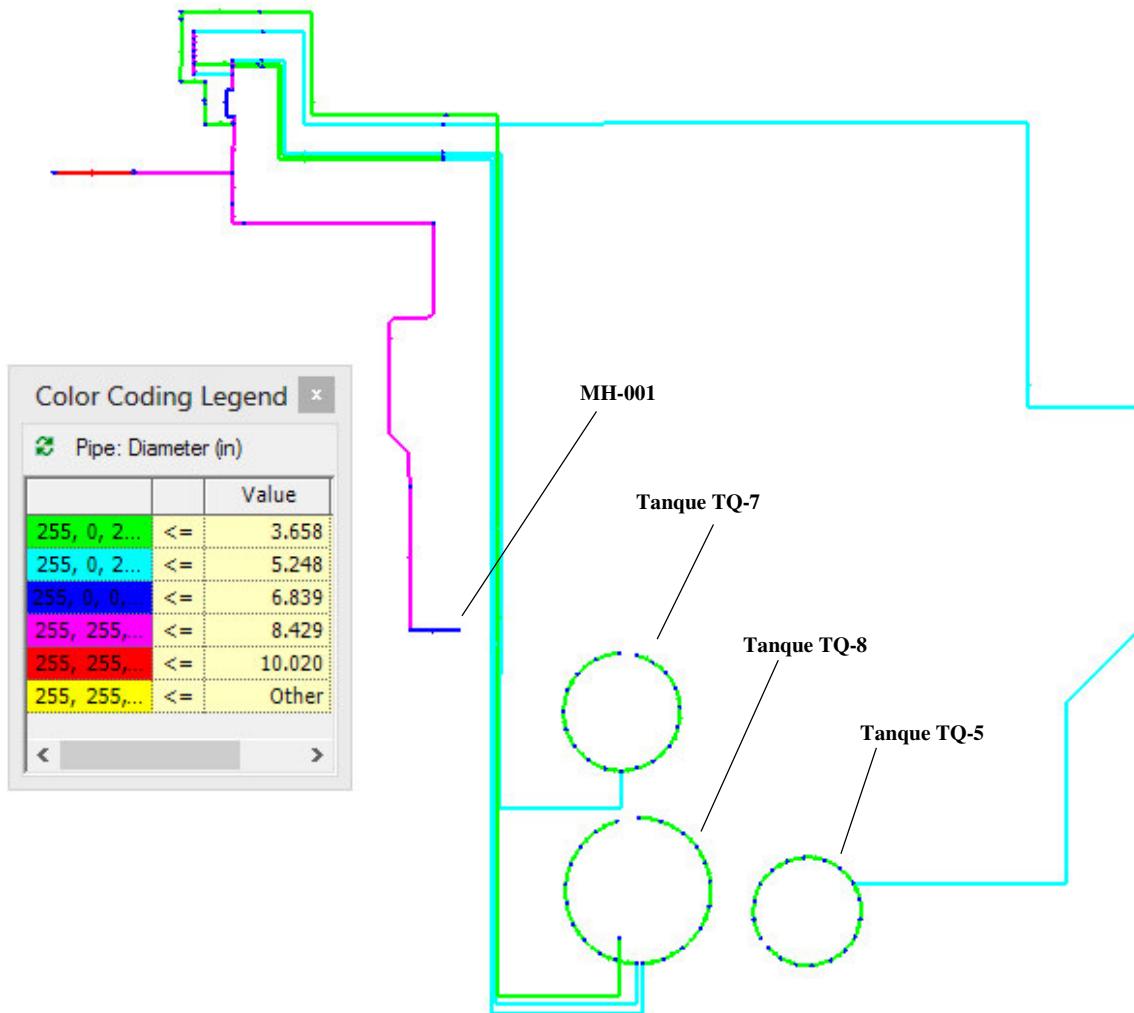
Tubería	Materia	Hazen-William s C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (\$.)	Diámetro (in)	Costo (\$.)	Diámetro (in)	Costo (\$.)
P-417	Acero	120	4.026	691.93	5.047	716.98	4.026	691.93
P-418	Acero	120	3.068	367.45	3.068	367.45	3.068	367.45
P-422	Acero	120	3.068	268.63	3.068	268.63	3.068	268.63
P-425	Acero	120	5.047	524.16	5.047	524.16	5.047	524.16
P-426	Hdpe	150	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10	3.633	1,221.10
P-427	Hdpe	150	3.633	1,107.08	3.633	1,107.08	3.633	1,107.08
P-428	Hdpe	150	4.491	1,806.41	4.491	1,806.41	4.491	1,806.41
P-434	Hdpe	150	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74	4.491	1,637.74
				13,477.2		13,477.2		13,477.2
P-587	Acero	120	4.026	3	4.026	3	4.026	3
P-610	Acero	120	4.026	9,687.89	4.026	9,687.89	4.026	9,687.89
P-611	Acero	120	4.026	9,687.89	4.026	9,687.89	4.026	9,687.89
P-632	Acero	120	5.047	8,055.22	5.047	8,055.22	5.047	8,055.22
P-654	Acero	120	2.469	293.36	2.469	293.36	3.068	383.76
P-666	Hdpe	150	2.823	1,201.38	2.823	1,201.38	2.823	1,201.38
P-674	Acero	120	3.068	5,837.95	3.068	5,837.95	3.068	5,837.95
Po-428	Hdpe	150	6.963	3,663.77	6.963	3,663.77	6.963	3,663.77
P-433	Hdpe	150	6.963	255.24	6.963	255.24	6.963	255.24
P-695	Hdpe	150	5.348	391.01	5.348	391.01	5.348	391.01
COSTO TOTAL			S/. 60,175.45		S/. 60,200.49		S/. 60,265.84	

Tabla 6.4: Resultados de simulación para el escenario 5

Elemento	Mínima Presión Requerida (psi)	Máxima Presión Requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
Cámara TQ-8	41.13	100	54.09	0	54.09	0	55.1	0
J-593	22.70	175	27.07	0	27.05	0	27.07	0
J-583	22.70	175	27.18	0	27.16	0	27.18	0
J-612	20.00	175	29.87	0	30.98	0	29.87	0
J-603	20.00	175	29.87	0	30.98	0	29.87	0
J-561	20.00	175	23.65	0	23.63	0	23.65	0
J-571	20.00	175	23.65	0	23.63	0	23.65	0
MH-001	100.00	175	111.63	0	111.34	0	111.6	0

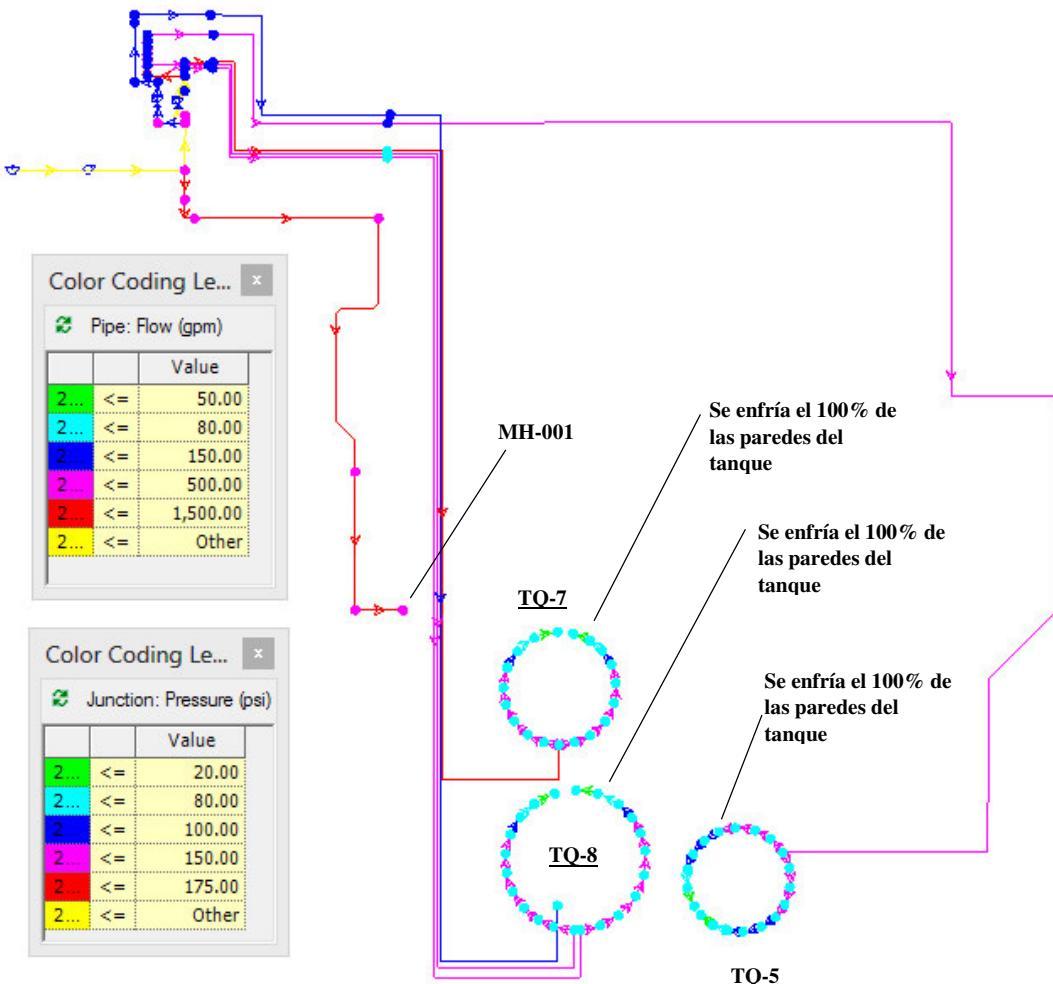
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°5 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.5):

Figura 6.5: Solución óptima para el escenario 5



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados gráficos de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-8) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. En caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.6).

Figura 6.6: Simulación optimizada para el escenario 5



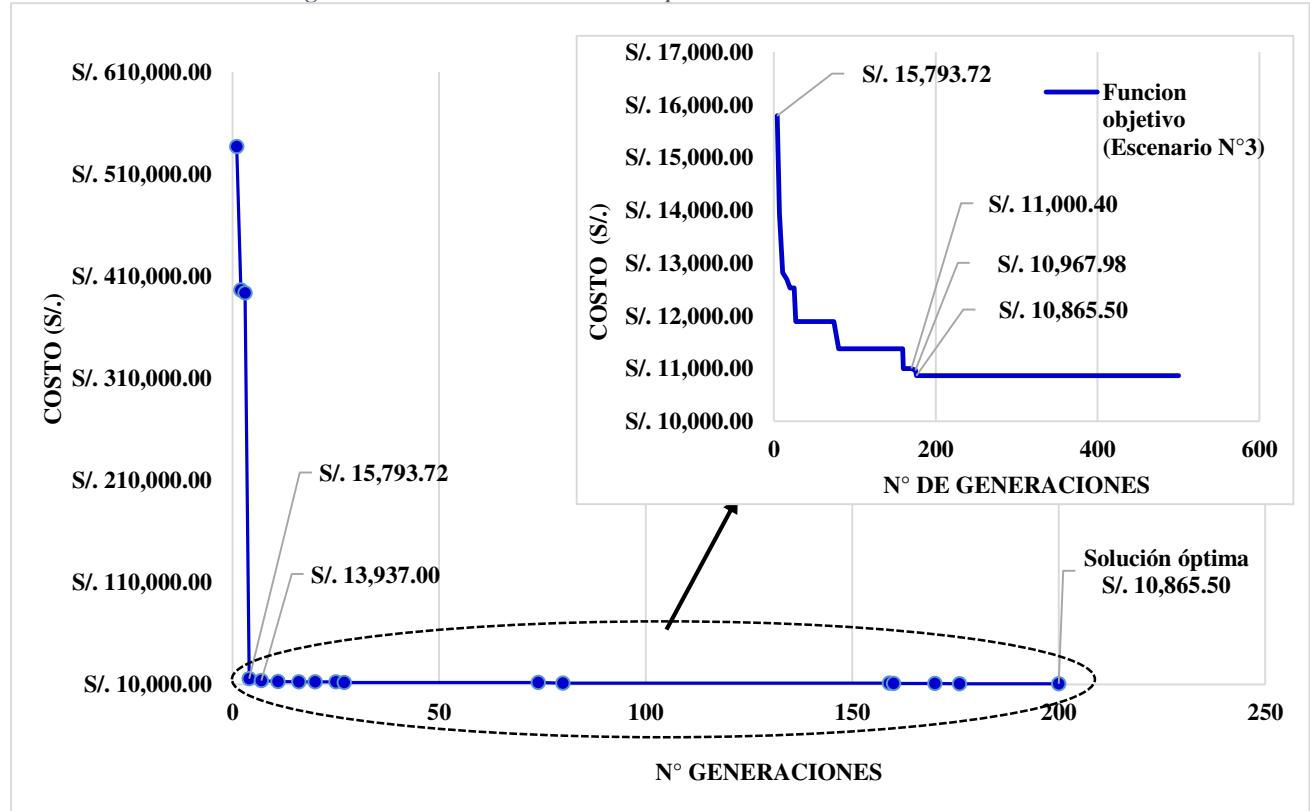
En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma se comporta alrededor de 54.09 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 41.13 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 147.10 gpm resultando mayor al caudal teórico de 128.32 gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-8 trabajan con presiones entre 22.77 psi y 80 psi, el caudal real que ingresa a la sección izquierda y derecha del anillo activado en el tanque TQ-8 es de 394.50gpm y 395.28gpm respectivamente, estos valores resultan superiores al caudal teórico requerido de 343.58gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MH-001 supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite supera los 500 gpm (teórico).

Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-7, estas trabajan con presiones superiores a 20 psi y menores a 80 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-7 es igual a 733.27 gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 566.22 gpm. En cuanto a los resultados de la simulación para los rociadores pulverizadores que enfrián las paredes del tanque TQ-5, se obtuvieron presiones de trabajo entre 20 psi y 80psi, el caudal real simulado que ingresa al anillo activado del TQ-5 es de 499.75 gpm, el cual supera al caudal teórico de 376.81gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.3 Escenario N°3: Incendio en tanque TQ-6

Figura 6.7: Evolución de AG para el escenario N°3



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio. De la misma grafica se obtiene que luego de las 160 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.11,000.40 soles, sin embargo para la generación 175, este valor disminuye a un costo de S/. 10,967.98 soles y desde la generación 176 en adelante se obtiene un costo constante de S/. 10,865.50 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación aumenta, obsérvese también que la diferencia económica entre las tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.33,542.94 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.5 se puede apreciar que la tubería de acero P-206 puede tomar un diámetro nominal de 5" (solucion1), 5" (solución 2) o 6" (solución 3) y la tubería de acero P-655 también puede tomar un diámetro nominal de 2" (solución 1), 2 ½" (solución 2) o 2" (solución 3) ya que según la Tabla 6.6 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.5: Soluciones de la red de tuberías en el escenario 3

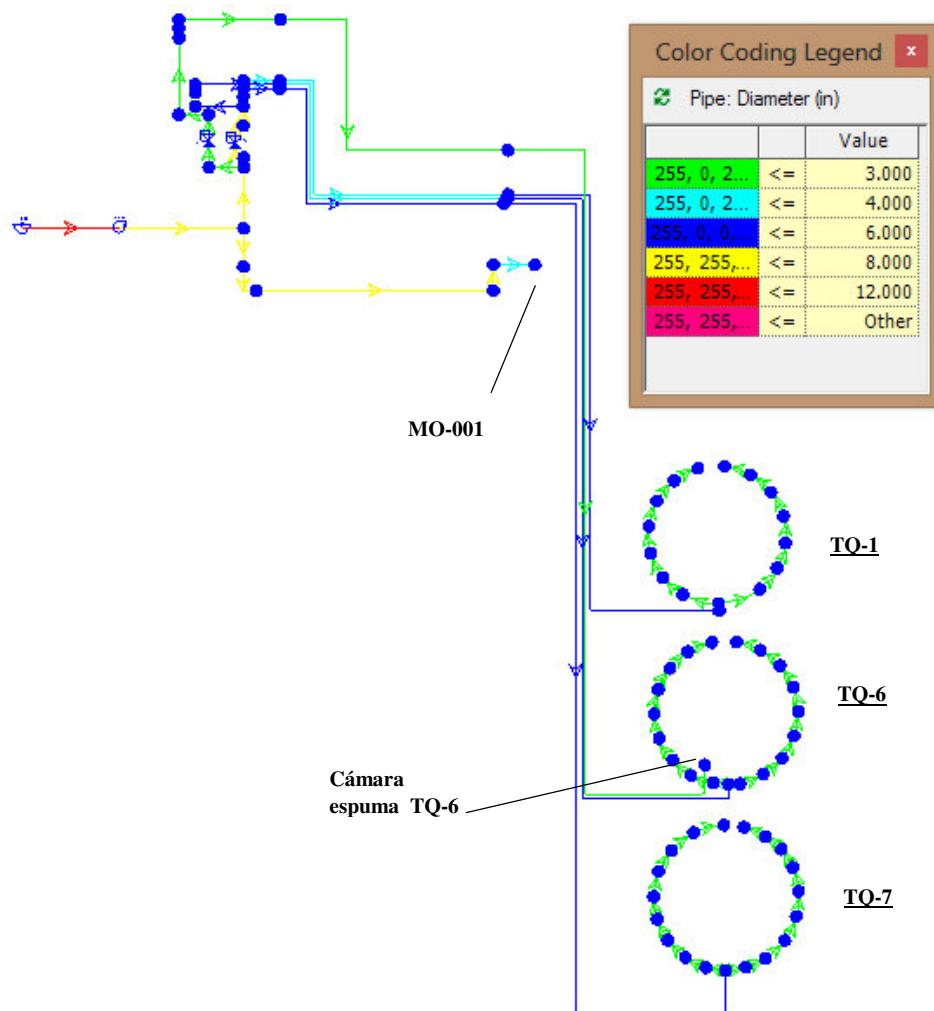
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-206	Acero	120	5.047	524.16	5.047	524.16	6.065	659.06
P-212	Hdpe	150	3.633	1,107.08	3.633	1,107.08	3.633	1,107.08
P-655	Acero	120	2.067	190.88	2.469	293.36	2.067	190.88
P-668	Hdpe	150	1.917	400.93	1.917	400.93	1.917	400.93
P-676	Acero	120	2.067	1,790.93	2.067	1,790.93	2.067	1,790.93
P-697	Acero	120	5.047	6,851.52	5.047	6,851.52	5.047	6,851.52
COSTO TOTAL			S/. 10,865.50		S/. 10,967.98		S/. 11,000.40	

Tabla 6.6: Resultados de simulación para el escenario 3

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
Cámara TQ-6	41.77	100	47.97	0	48.61	0	47.97	0
J-267	20.00	175	25.16	0	25.16	0	25.34	0
J-258	20.00	175	25.16	0	25.16	0	25.34	0

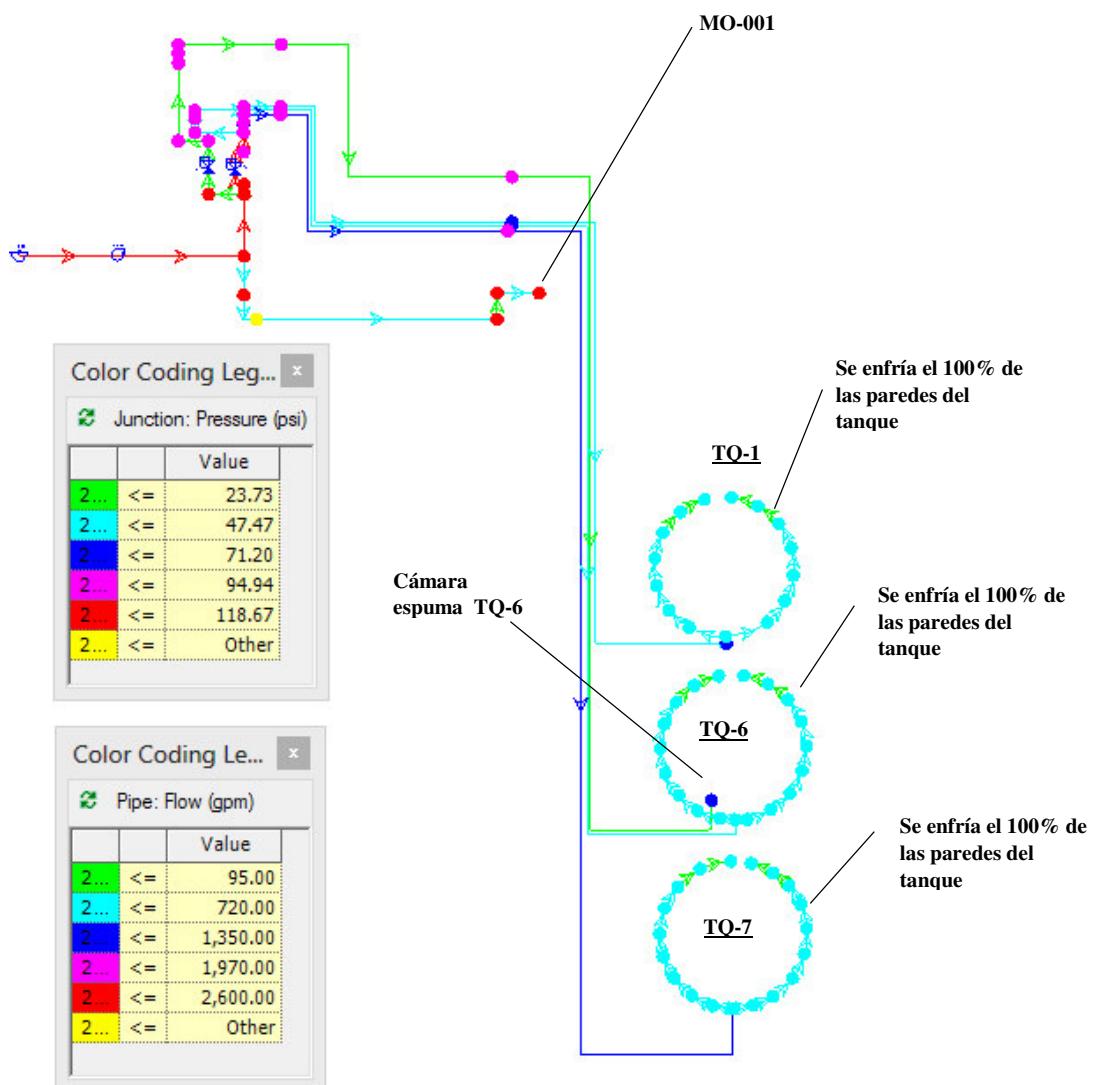
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°3 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.8):

Figura 6.8: Solución óptima para el escenario 3



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-6) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.9).

Figura 6.9: Simulación optimizada para el escenario 3



En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma ubicada en el TQ-6 se comporta alrededor de 47.97 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 41.77 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 83.11gpm resultando mayor al caudal teórico de 77.59gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-6 trabajan con presiones entre 23.73 psi y 47.47 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-6 es de 673.16gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 537.25gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MO-001 de 112.43 psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es 530.16gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

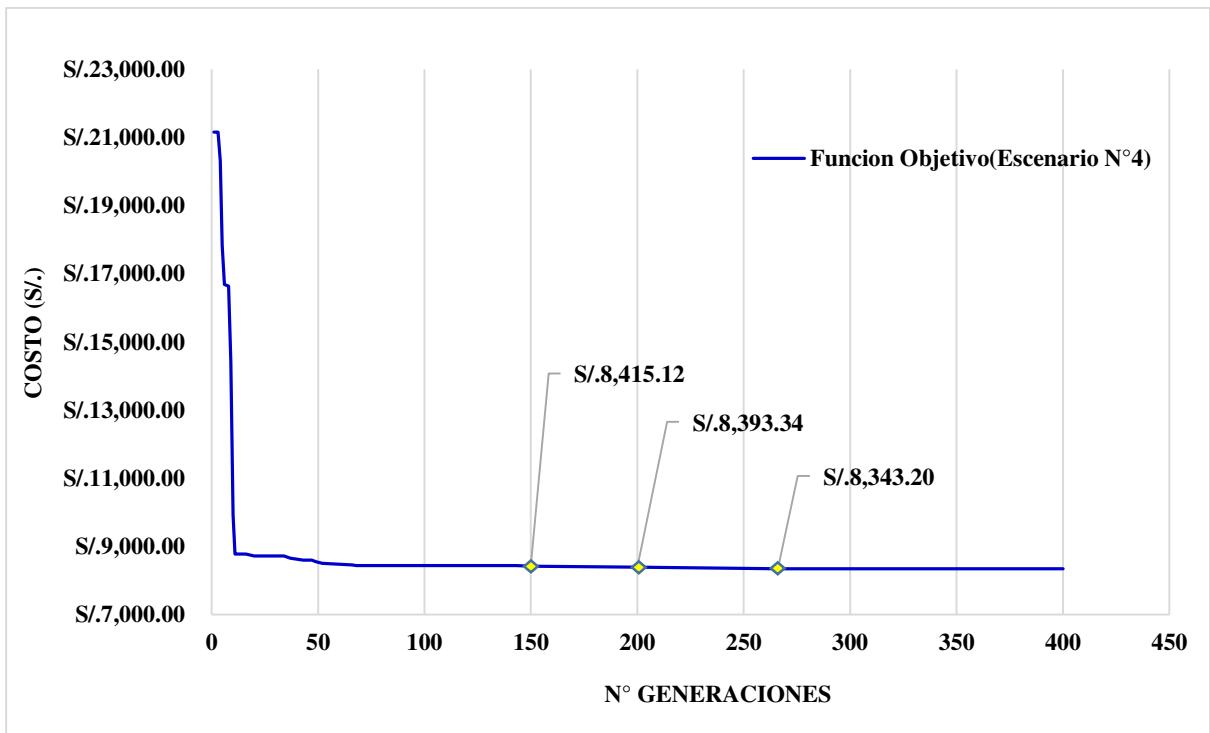
Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-7, estas trabajan con presiones superiores a 23.73 psi y menores a 47.47 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-7 es igual a 732.40 gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 566.22 gpm.

En cuanto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-1, se obtuvieron presiones de trabajo entre 23.73 psi y 47.47 psi, el caudal real simulado que ingresa al anillo activado del TQ-1 es de 576.59 gpm, el cual supera al caudal teórico de 396.77 gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.4 Escenario N°4: Incendio en tanque TQ-7

Figura 6.10: Evolución de AG para el escenario N°4



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio, nótese que la curva inicia con costos elevados, esto es debido a que la solución encontrada está muy alejado de satisfacer las restricciones hidráulicas impuestas. De la misma grafica se obtiene que luego de las 150 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.8,415.12 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 200 sigue resultando un costo similar de S/. 8,393.34 soles y desde la generación 260 en adelante obtiene un costo constante de S/.8,343.20 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación aumenta, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este

criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.8,343.20 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.7 se puede apreciar que la tubería de acero P-383 puede tomar un diámetro nominal de 2 ½ " (solucion1), 2" (solución 2) o 2 ½ " (solución 3) y la tubería de acero P-661 también puede tomar un diámetro nominal de 3" (solución 1), 3 ½" (solución 2) o 3 ½ " (solución 3) ya que según la Tabla 6.8 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.7: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 4

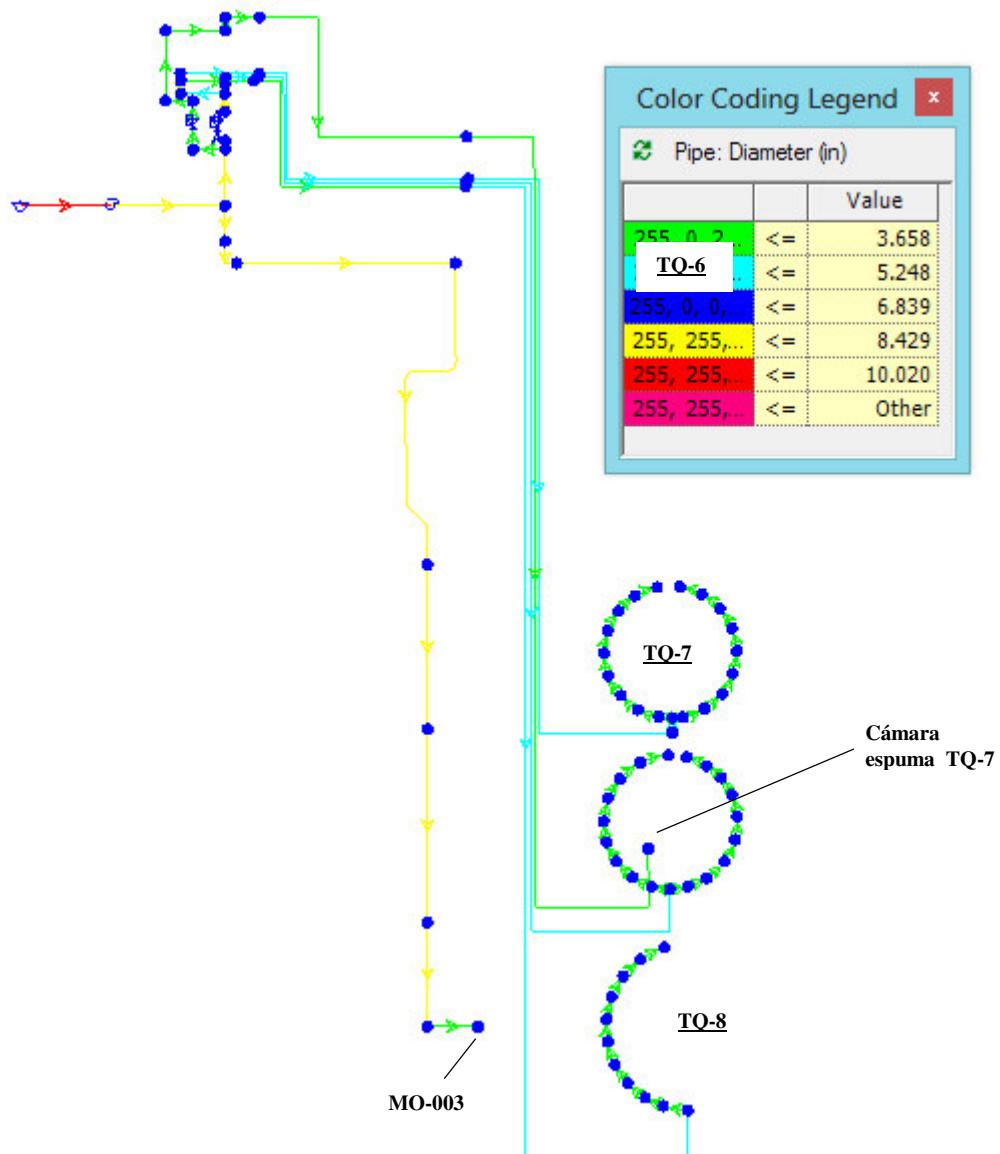
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (\$.)	Diámetro (in)	Costo (\$.)	Diámetro (in)	Costo (\$.)
P-382	Acero	120	2.469	140.81	2.469	140.81	2.469	140.81
P-383	Acero	120	2.469	62.34	2.067	40.56	2.469	62.34
P-435	Hdpe	150	6.963	2,105.20	6.963	2,105.20	6.963	2,105.20
P-437	Hdpe	150	6.963	2,211.37	6.963	2,211.37	6.963	2,211.37
P-661	Acero	120	3.068	191.88	3.548	263.8	3.548	263.8
P-667	Hdpe	150	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66
P-675	Acero	120	2.067	2,138.33	2.067	2,138.33	2.067	2,138.33
P-695	Hdpe	150	3.633	198.61	3.633	198.61	3.633	198.61
COSTO TOTAL				S/.8,343.20		S/. 8,393.34		S/.8,415.12

Tabla 6.8: Resultados de simulación para el escenario 4

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
MO-003	100.00	175	112.55	0	112.56	0	112.55	0
Cámara TQ-7	42.30	100	53.14	0	53.03	0	53.19	0

El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°4 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.11):

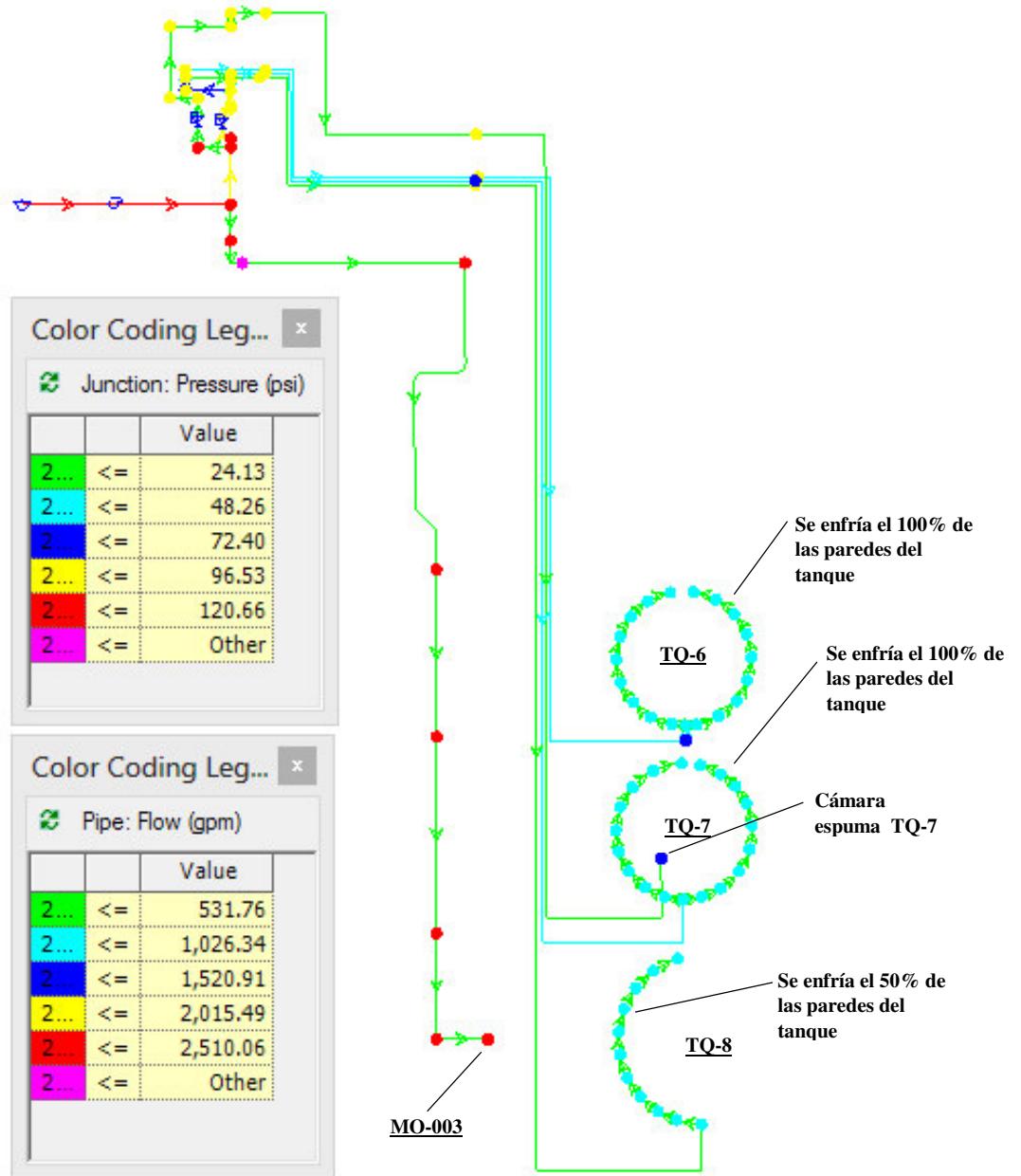
Figura 6.11: Solución óptima para el escenario 4



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-7) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se

puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.12).

Figura 6.12: Simulación optimizada para el escenario 4



En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma ubicada en el TQ-7 se comporta alrededor de 53.14 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 42.30 psi. En relación al caudal real

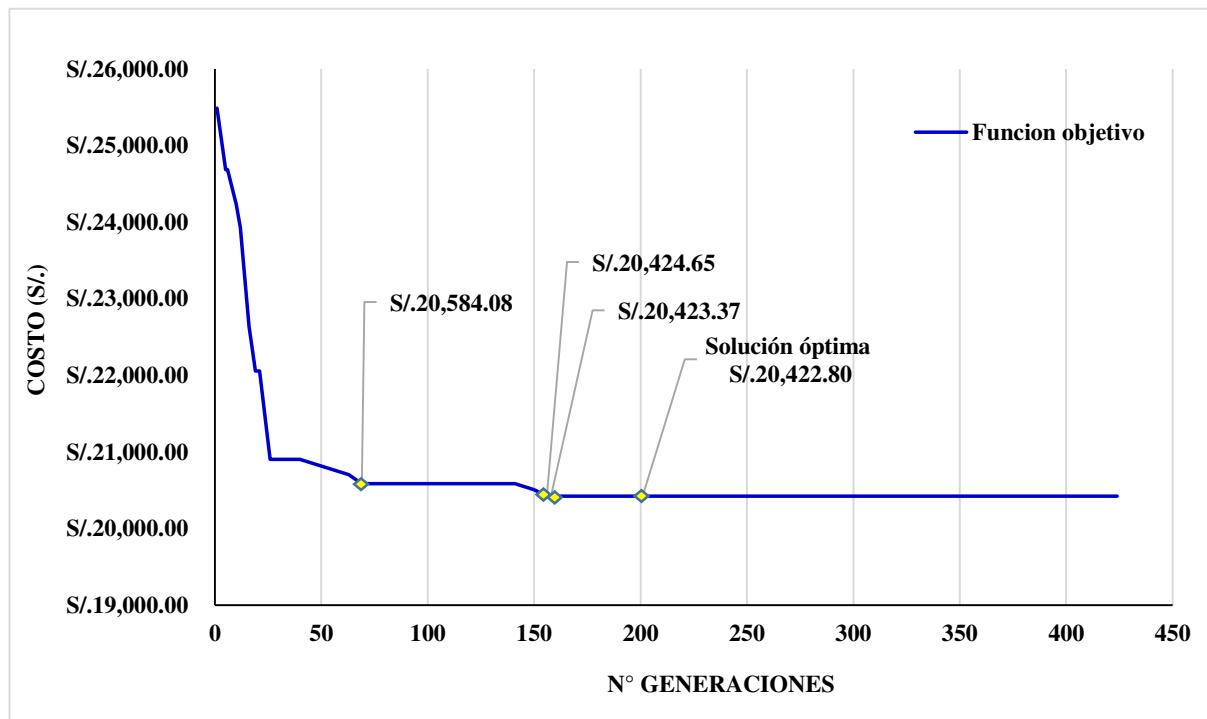
simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 87.47gpm resultando mayor al caudal teórico de 78.07gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-7 trabajan con presiones entre 24.13 psi y 48.26 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-7 es de 736.60gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 566.22gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MO-003 de 112.55psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es 530.46gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-6, estas trabajan con presiones superiores a 24.13 psi y menores a 48.26 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-6 es igual a 763.83 gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 537.25 gpm. En cuanto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián el 50% de la pared del tanque TQ-8, se obtuvieron presiones de trabajo entre 22.77 psi y 48.26 psi, el caudal real simulado que ingresa al semi anillo activado del TQ-8 es de 391.70gpm el cual supera al caudal teórico de 343.58gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.5 Escenario N°7: Incendio en tanque TQ-10

Figura 6.13: Evolución de AG para el escenario N°7



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio, nótese luego de las 150 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.20,424.65 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 153 sigue resultando un costo similar de S/. 20,423.37 soles y desde la generación 200 en adelante obtiene un costo constante de S/.20,422.80 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación va creciendo, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.20,422.80 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.9 se puede apreciar que la tubería de

acero P-472 puede tomar un diámetro nominal de 1 ½" (solucion1), 2" (solución 2) o 2 ½" (solución 3 ya que según la Tabla 6.10 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.9: Tres mejore soluciones de la red de tuberías en el escenario 7

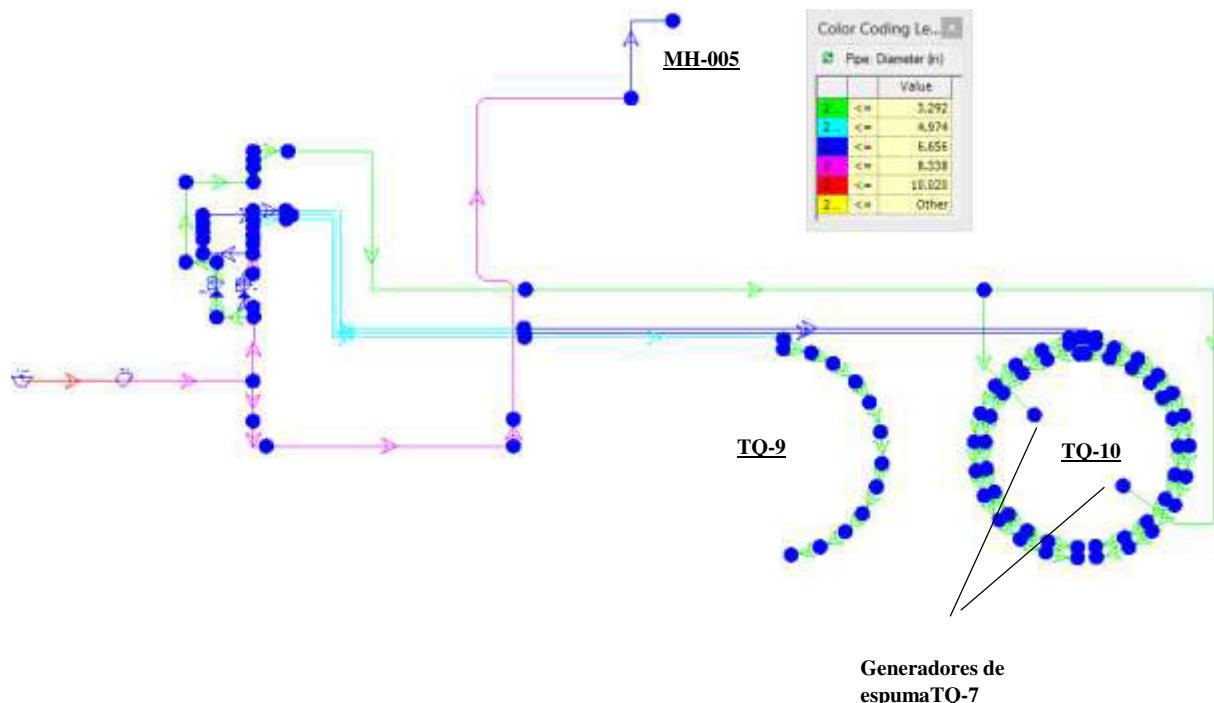
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solucion1		Solucion2		Solucion3	
			Diámetro (in)	Costo (S.)	Diámetro (in)	Costo (S.)	Diámetro (in)	Costo (S.)
P-455	Hdpe	150	6.963	10,277.54	6.963	10,277.54	6.963	10,277.54
P-420	Acero	120	5.047	716.98	5.047	716.98	5.047	716.98
P-431	Hdpe	150	4.491	1,806.41	4.491	1,806.41	4.491	1,806.41
P-471	Acero	120	3.548	197.85	3.548	197.85	3.548	197.85
P-472	Acero	120	1.61	1.82	2.067	2.39	2.469	3.67
P-474	Acero	120	2.067	23.86	2.067	23.86	2.067	23.86
P-657	Acero	120	2.067	95.44	2.067	95.44	2.067	95.44
P-670	Hdpe	150	1.917	400.93	1.917	400.93	1.917	400.93
P-687	Acero	120	2.469	1,246.78	2.469	1,246.78	2.469	1,246.78
P-689	Acero	120	2.067	1,169.14	2.067	1,169.14	2.067	1,169.14
P-695	Hdpe	150	5.348	391.01	5.348	391.01	5.348	391.01
P-698	Acero	120	5.047	3,744.00	5.047	3,744.00	5.047	3,744.00
P-688	Acero	120	1.61	351.04	1.61	351.04	1.61	351.04
COSTO TOTAL			S/. 20,422.80		S/. 20,423.37		S/. 20,424.65	

Tabla 6.10: Resultados de simulación para el escenario 7

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
J-486	32.75	175	45.87	0	45.81	0	45.8	0
J-475	32.75	175	44.02	0	44.43	0	44.53	0
Generador 1 (TQ-10)	27.62	150	43.84	0	43.84	0	43.84	0
Generador 2 (TQ-10)	27.62	150	42.17	0	42.17	0	42.17	0
MH-005	100.00	175	118.72	0	118.7	0	118.69	0

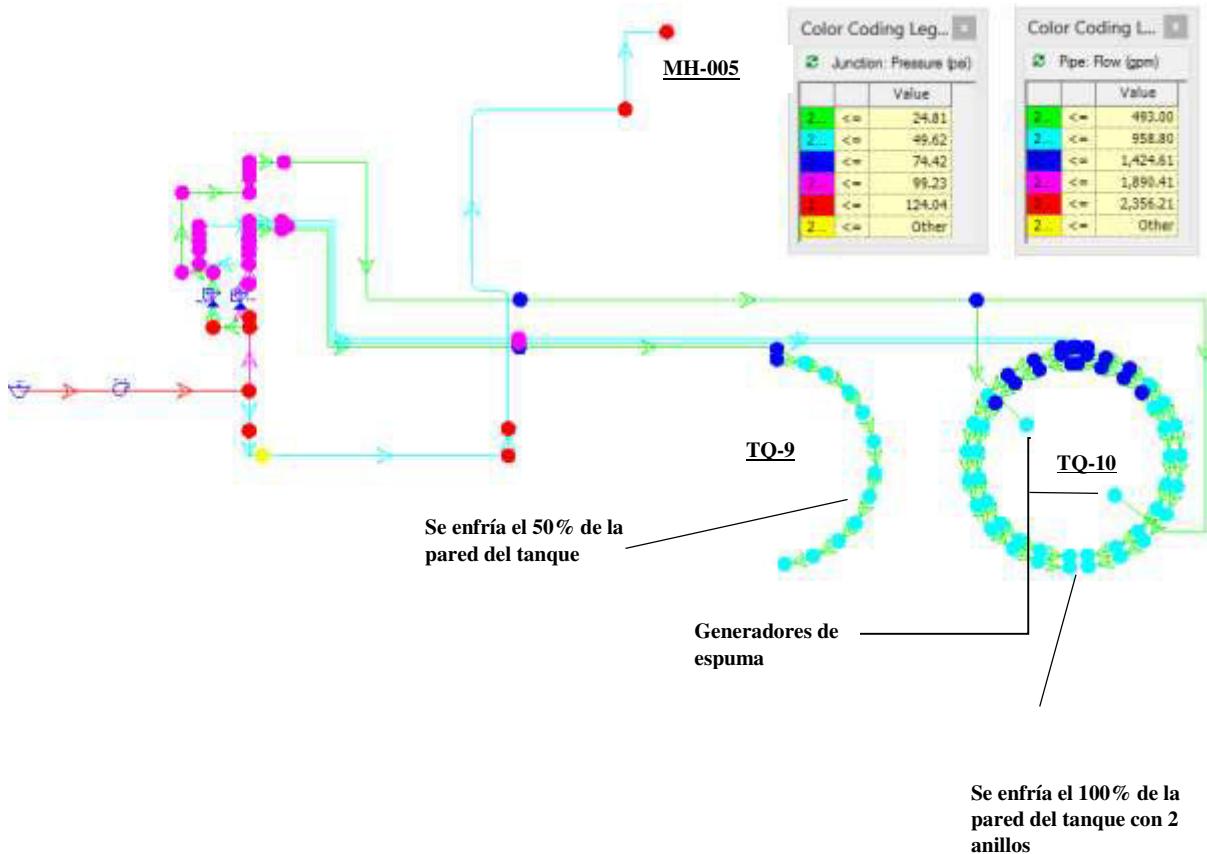
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°7 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.14):

Figura 6.14: Solución óptima para el escenario 7



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-10) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.15).

Figura 6.15: Simulación optimizada para el escenario 7



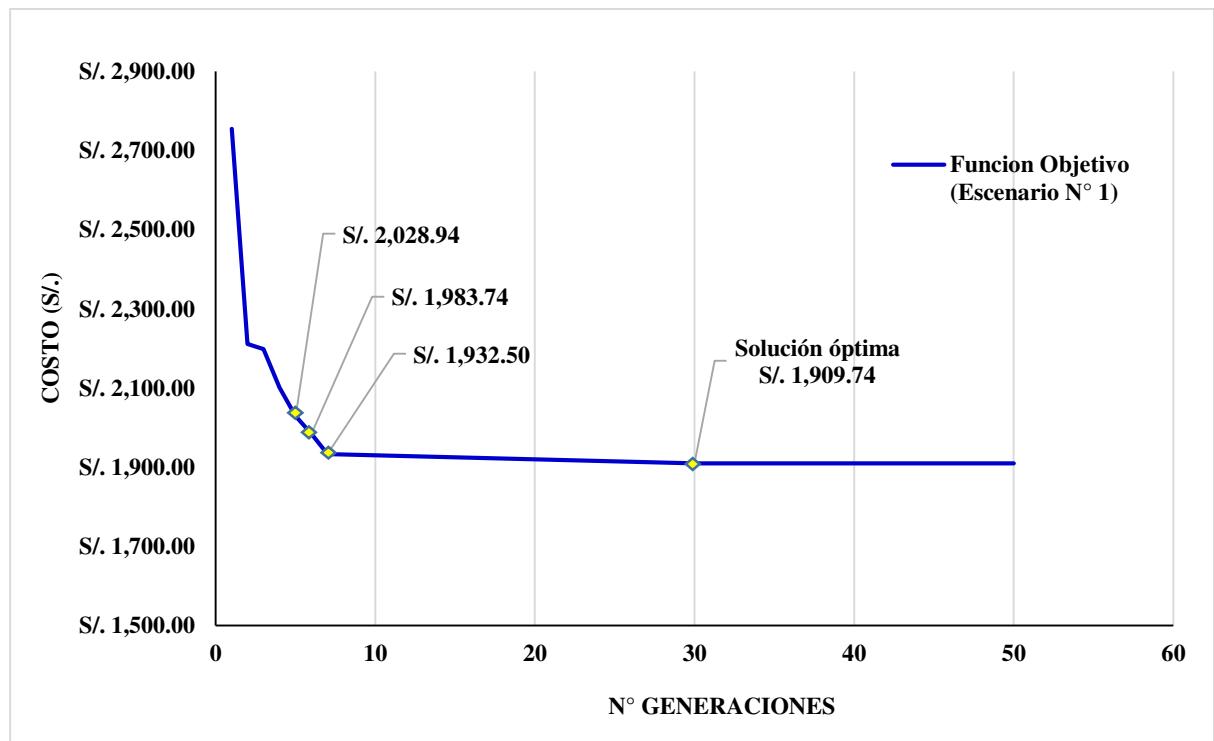
En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en los generadores de espuma ubicada en el TQ-10 se comporta alrededor de 43.84 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 27.62 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 52.97gpm resultando mayor al caudal teórico de 42.06gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-10 trabajan con presiones entre 24.81 psi y 51.90 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-10 es de 1243.00gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 1032.41gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MH-005 de 118.72 psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es 544.80gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfría el 50% de la pared del tanque TQ-9, estas trabajan con presiones superiores a 24.81psi y menores a 49.62 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del semi anillo activado del TQ-9 es igual a 463.48gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 394.17gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.6 Escenario N°1: Incendio en tanque TQ-1

Figura 6.16: Evolución de AG para el escenario N°1



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge rápidamente en pocas generaciones al valor óptimo, esto sucede porque para este escenario N°1 de incendio solamente se busca los diámetros óptimos de 3 tuberías. Nótese que luego de las 6 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.1,983.74 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 7 sigue resultando un costo similar de S/. 1,932.50 soles y desde la generación 30 en adelante obtiene un costo constante de S/.1,909.74 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación aumenta, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.1,909.74 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.11 se puede apreciar que la tubería de acero P-390 puede tomar un diámetro nominal de 1 ½" (solucion1), 2" (solución 2) o 2 ½" (solución 3) ya que según la Tabla 6.12 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.11: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 1

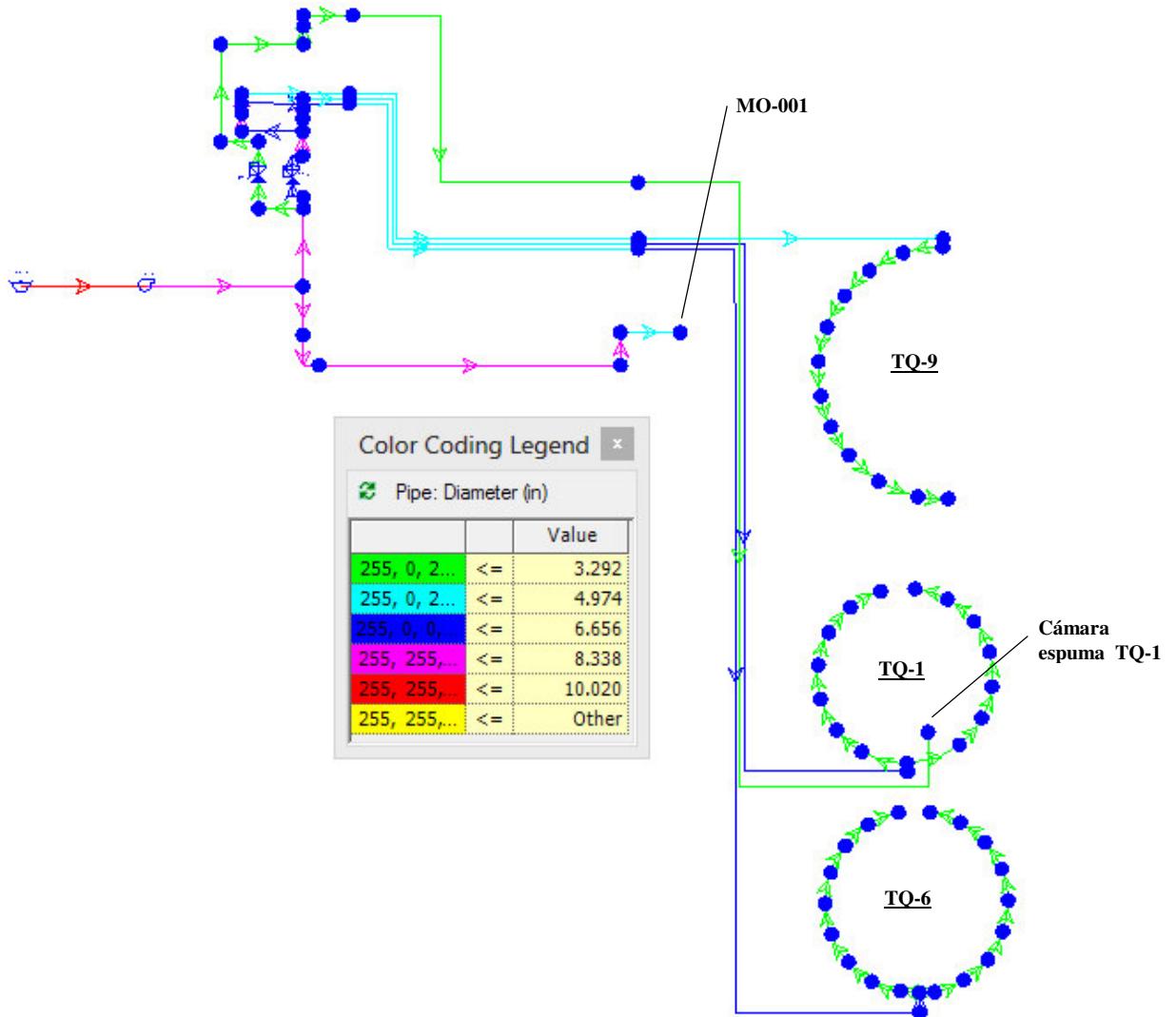
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-396	Hdpe	150	1.917	400.93	1.917	400.93	1.917	400.93
P-696	Acero	120	2.067	1,436.13	2.067	1,436.13	2.067	1,436.13
P-390	Acero	120	1.61	72.68	2.067	95.44	2.469	146.68
COSTO TOTAL			S/. 1,909.74		S/. 1,932.50		S/. 1,983.74	

Tabla 6.12: Resultados de simulación para el escenario 1

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
Cámara TQ-1	46.24	100	60.76	0	61.97	0	62.28	0

El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°1 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.17):

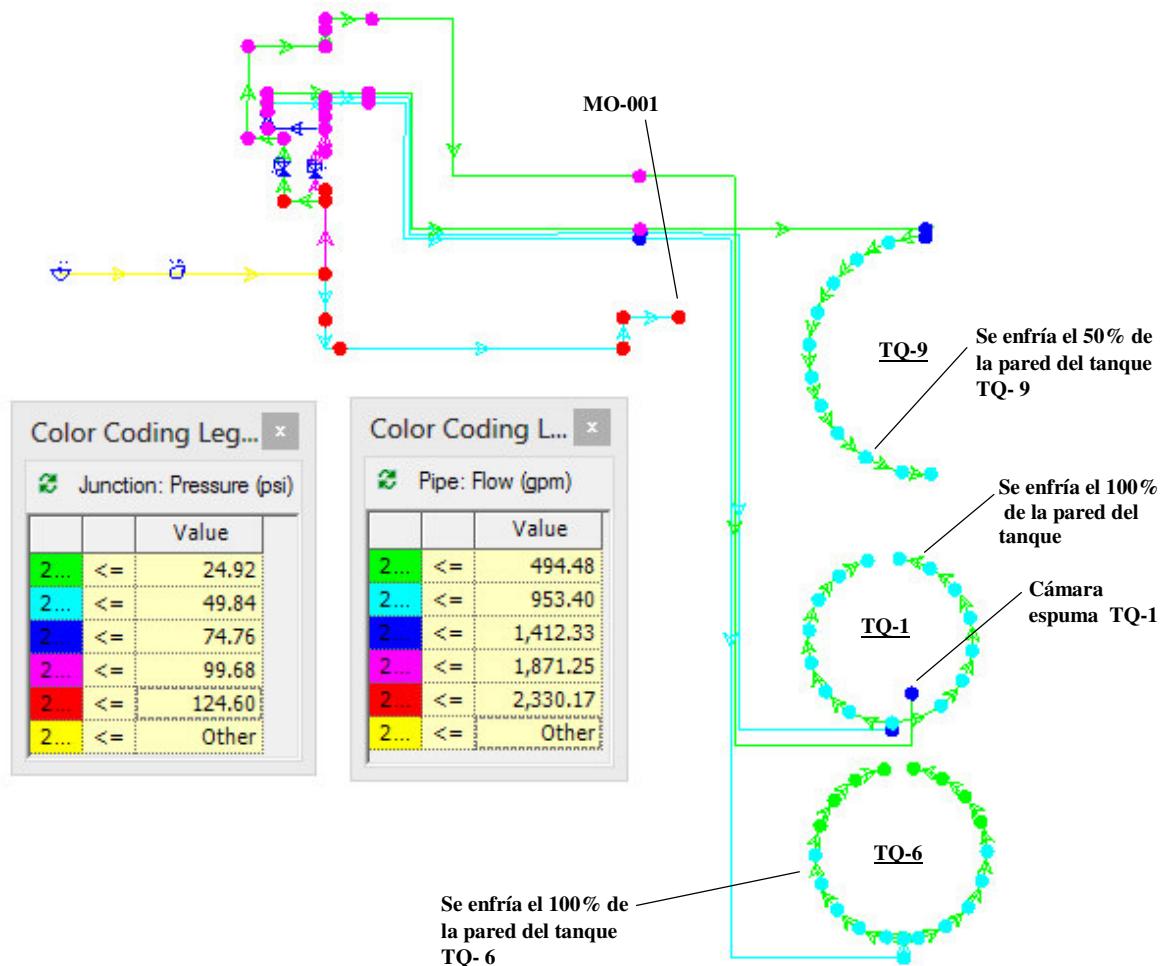
Figura 6.17: Solución óptima para el escenario 1



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-1) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de

agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.18).

Figura 6.18: Simulación optimizada para el escenario 1



En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma ubicada en el TQ-1 se comporta alrededor de 60.76 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 46.24 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 70.15gpm resultando mayor al caudal teórico de 61.22gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-1 trabajan con presiones entre 24.92 psi y 49.84 psi, el caudal real que ingresa al anillo

activado en el tanque TQ-1 es de 582.33gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 396.77gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MO-001 de 117.81psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es de 542.70gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

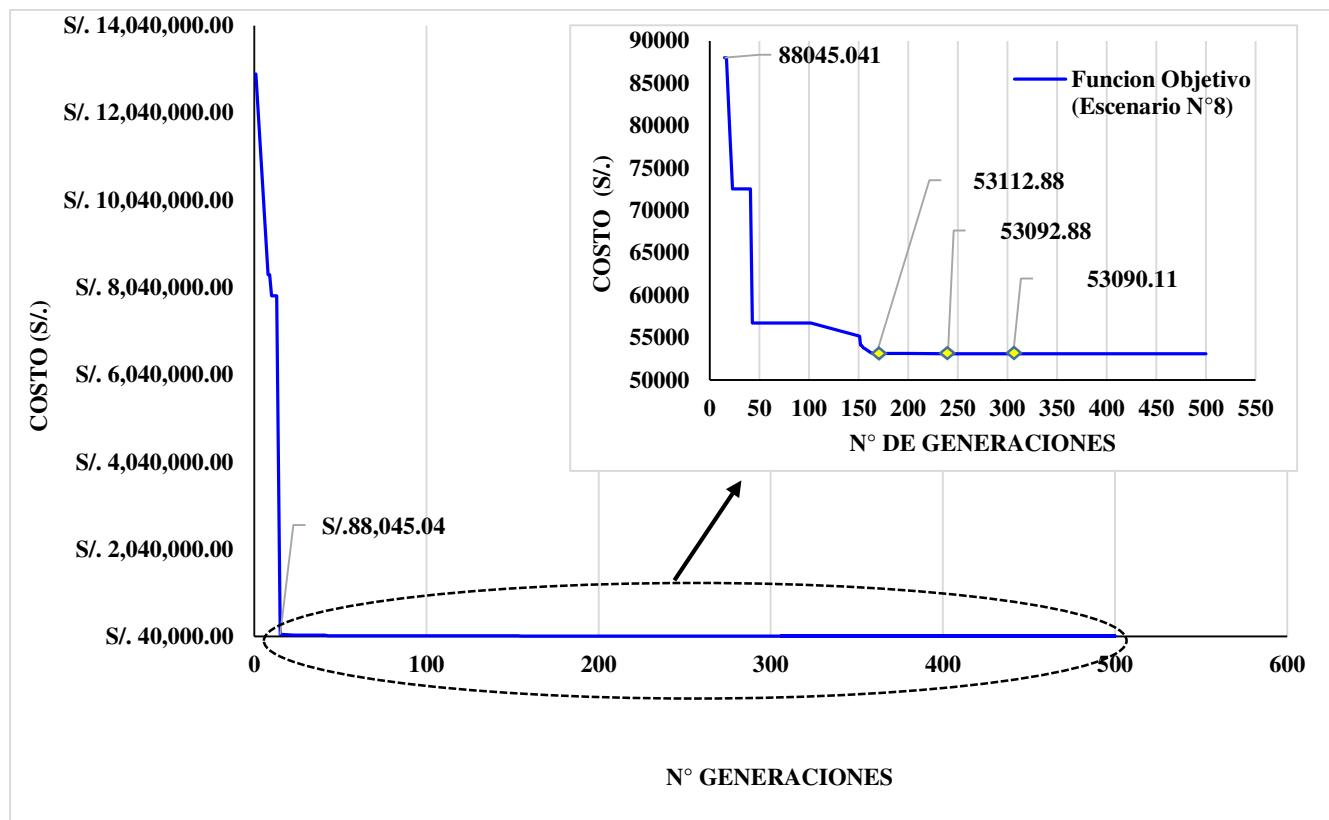
Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián las paredes del tanque TQ-6, estas trabajan con presiones superiores a 24.39 psi y menores a 49.84 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-6 es igual a 662.79 gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 537.25 gpm.

En cuanto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfrián el 50% de la pared del tanque TQ-9, se obtuvieron presiones de trabajo entre 31.11psi y 47.04psi, el caudal real simulado que ingresa al semi anillo activado del TQ-9 es de 472.20gpm el cual supera al caudal teórico de 394.17gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.7 Escenario N°8: Incendio en tanque TQ-11

Figura 6.19: Evolución de AG para el escenario N°8



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio, nótese que la curva inicia con costos elevados, esto es debido a que la solución encontrada está muy alejado de satisfacer las restricciones hidráulicas impuestas, por lo que se ha castigado a estas malas soluciones con un factor de penalidad igual a $\lambda = 1,000,000$. De la misma grafica se obtiene que luego de las 168 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.53,112.88 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 240 sigue resultando un costo similar de S/. 53,092.88 soles y desde la generación 306 en adelante obtiene un costo constante de S/.53,090.11 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación va creciendo, obsérvese también

que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.53,090.11 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.13 se puede apreciar que la tubería de acero P-536 puede tomar un diámetro nominal de 3 ½" (solucion1), 4" (solución 2) o 5" (solución 3) ya que según la Tabla 6.14 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.13: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 8

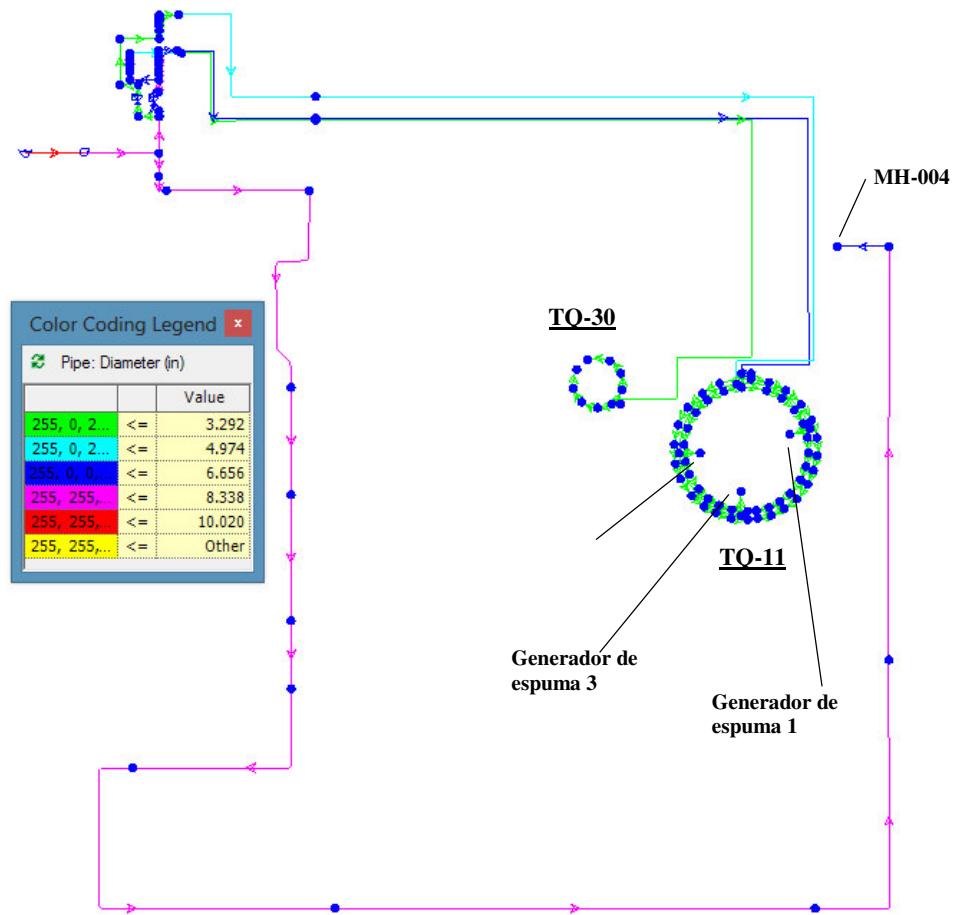
Tubería	Materia	Hazen-William s C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetr o (in)	Costo (S/.)	Diámetr o (in)	Costo (S/.)	Diámetr o (in)	Costo (S/.)
P-432	Hdpe	150	1.917	342.84	1.917	342.84	1.917	342.84
P-433	Hdpe	150	5.348	2,404.01	5.348	2,404.01	5.348	2,404.01
P-522	Acero	120	2.469	3,630.33	2.469	3,630.33	2.469	3,630.33
P-523	Acero	120	3.068	254.24	3.068	254.24	3.068	254.24
P-533	Acero	120	6.065	11,062.86	6.065	11,062.86	6.065	11,062.86
P-534	Acero	120	1.61	1.82	1.61	1.82	1.61	1.82
P-535	Acero	120	5.047	280.8	5.047	280.8	5.047	280.8
P-536	Acero	120	3.548	6.6	4.026	9.03	5.047	9.36
P-672	Hdpe	150	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66
P-680	Acero	120	1.61	167.53	1.61	167.53	1.61	167.53
P-681	Acero	120	1.61	36.34	1.61	36.34	1.61	36.34
P-683	Acero	120	1.61	245.3	1.61	245.3	1.61	245.3
P-684	Acero	120	1.61	36.34	1.61	36.34	1.61	36.34
P-685	Acero	120	1.61	167.53	1.61	167.53	1.61	167.53
P-686	Acero	120	1.61	36.34	1.61	36.34	1.61	36.34
P-691	Acero	120	3.548	6,397.15	3.548	6,397.15	3.548	6,397.15
P-439	Hdpe	150	6.963	2,211.37	6.963	2,211.37	6.963	2,211.37
P-441	Hdpe	150	6.963	5,950.81	6.963	5,950.81	6.963	5,950.81
P-443	Hdpe	150	6.963	7,623.45	6.963	7,623.45	6.963	7,623.45
P-447	Hdpe	150	6.963	1,652.31	6.963	1,652.31	6.963	1,652.31
P-449	Hdpe	150	6.963	7,737.52	6.963	7,737.52	6.963	7,737.52
P-696	Hdpe	150	5.348	391.01	5.348	391.01	5.348	391.01
P-659	Acero	120	1.61	72.68	1.61	72.68	1.61	72.68
P-421	Acero	120	5.047	716.98	5.047	716.98	5.047	716.98
P-424	Acero	120	3.548	369.32	3.548	369.32	3.548	369.32
COSTO TOTAL			S/. 53,090.11		S/. 53,092.11		S/. 53,092.88	

Tabla 6.14: Resultados de simulación para el escenario 8

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
J-493	29.36	175	31.26	0	31.26	0	31.26	0
J-497	29.36	175	31.26	0	31.26	0	31.26	0
Generador1 (TQ-11)	39.03	150	60.37	0	60.37	0	60.37	0
Generador2 (TQ-11)	39.03	150	56.14	0	56.14	0	56.14	0
Generador3 (TQ-11)	39.03	150	53.83	0	53.83	0	53.83	0
J-549	30.97	175	32.37	0	32.38	0	32.4	0
J-513	30.97	175	33.31	0	33.31	0	33.3	0
MH-004	100.00	175	122.08	0	122.08	0	122.08	0
J-525	30.97	175	33.31	0	33.31	0	33.3	0
J-537	30.97	175	32.37	0	32.38	0	32.4	0

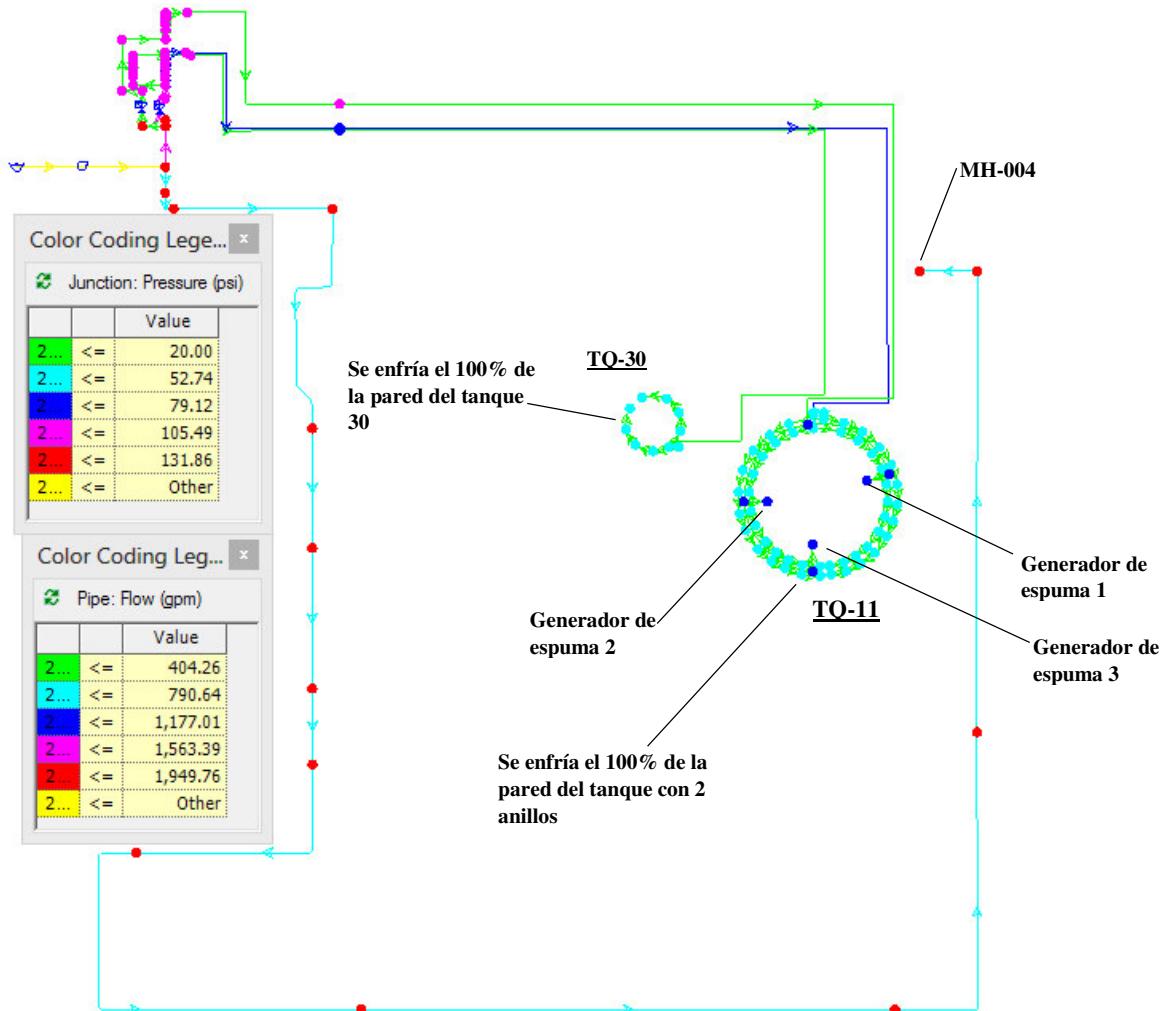
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°8 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.20):

Figura 6.20: Solución óptima para el escenario 8



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-11) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.21).

Figura 6.21: Simulación optimizada para el escenario 8



En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se obtuvo que la presión simulada en el Generador de espuma 1,2 y 3 ubicados en el TQ-11 es de 60.37 psi, 56.14 psi y 53.83 psi respectivamente, resultando mayor a la presión mínima requerida de 39.03 psi. En relación al caudal real simulado que emite el Generador 1, 2 y 3 es de 38.85 gpm, 37.46 gpm y 36.68 gpm respectivamente, resultando mayor al caudal teórico de 31.25 gpm. Asimismo se logra obtener que los rociadores del tanque TQ-11 trabajan con presiones entre 32.37 psi y 52.74 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-11 es de 1141.04gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 1095.23gpm. Por otra parte podemos

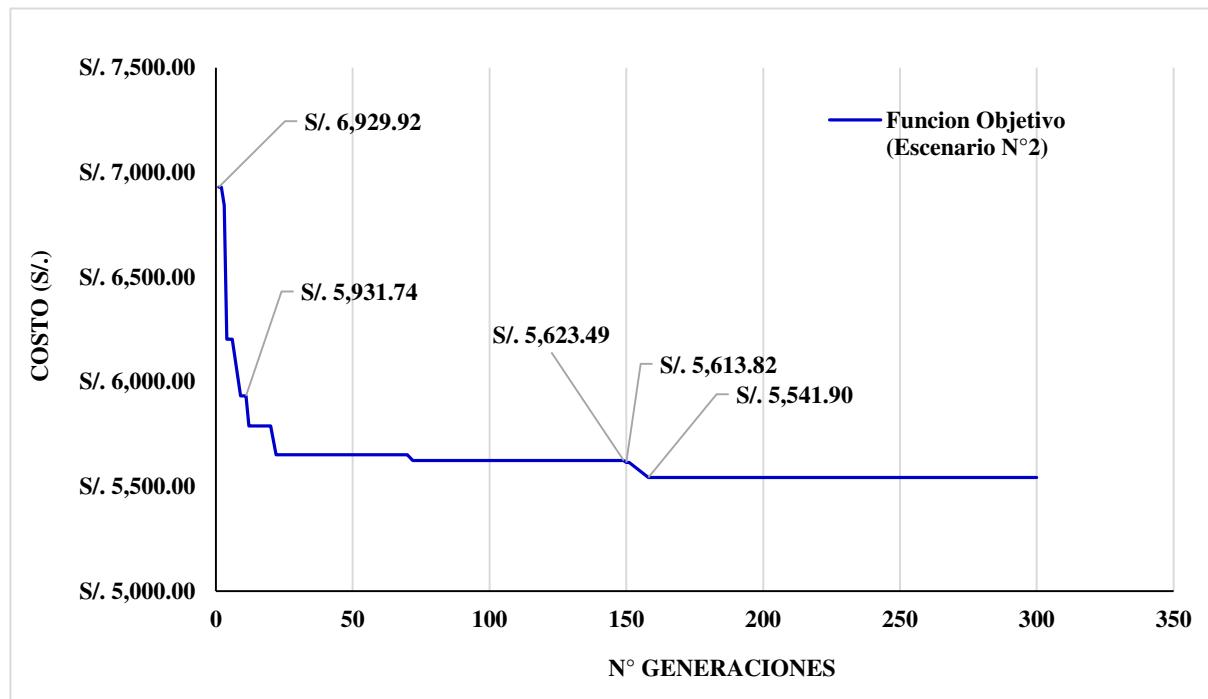
observar que la presión en el MH-004 de 122.08psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es de 552.46gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfriá el 100% de la pared del tanque TQ-30, estas trabajan con presiones superiores a 29.36psi y menores a 52.74 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-30 es igual a 143.27gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 130.05gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.8 Escenario N°2: Incendio en tanque TQ-5

Figura 6.22: Evolución de AG para el escenario N°2



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio. De la misma grafica se obtiene que luego de las 149 generaciones (iteraciones) los

costos se aproximan al valor de S/.5,623.49 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 151 sigue resultando un costo similar de S/.5,613.82 soles y desde la generación 158 en adelante obtiene un costo constante de S/.5,541.90 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación va aumentando, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.5,541.90 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.15 se puede apreciar que la tubería de acero P-694 puede tomar un diámetro nominal de $2\frac{1}{2}$ " (solucion1), $2\frac{1}{2}$ " (solución 2) o 3" (solución 3) y la tubería de acero P-660 también puede tomar un diámetro nominal de 3" (solución 1), $3\frac{1}{2}$ " (solución 2) o $2\frac{1}{2}$ " (solución 3) ya que según la Tabla 6.16 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.15: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 2

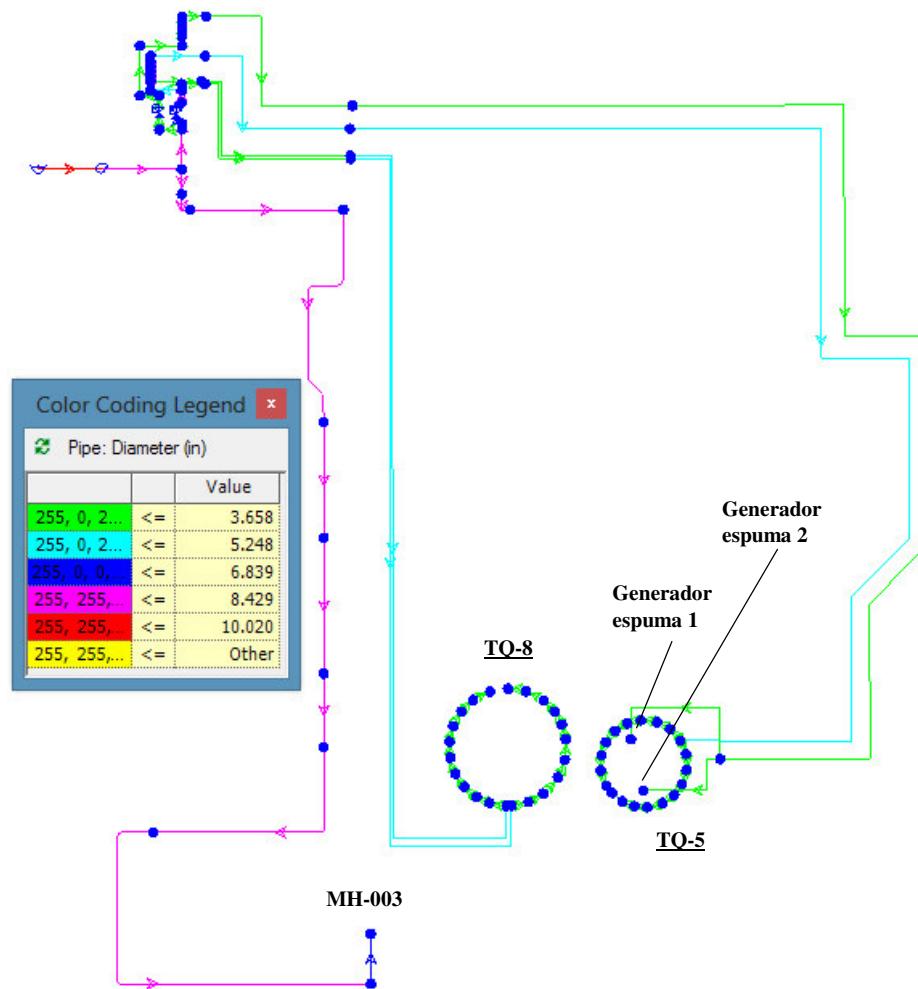
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-673	Hdpe	150	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66	3.633	1,294.66
P-692	Acero	120	2.067	2,863.20	2.067	2,863.20	2.067	2,863.20
P-695	Hdpe	150	5.348	369.29	5.348	369.29	5.348	369.29
P-693	Acero	120	2.469	411.44	2.469	411.44	2.469	411.44
P-694	Acero	120	2.469	411.44	2.469	411.44	3.068	538.22
P-660	Acero	120	3.068	191.88	3.548	263.8	2.469	146.68
COSTO TOTAL			S/. 5,541.90		S/. 5,613.82		S/. 5,623.49	

Tabla 6.16: Resultados de simulación para el escenario 2

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
Generador1 (TQ-5)	20.62	150	56.54	0	56.58	0	56.36	0
Generador2 (TQ-5)	20.62	150	56.54	0	56.58	0	56.56	0
MH-003	100.00	175	124.83	0	124.83	0	124.83	0

El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°2 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.23):

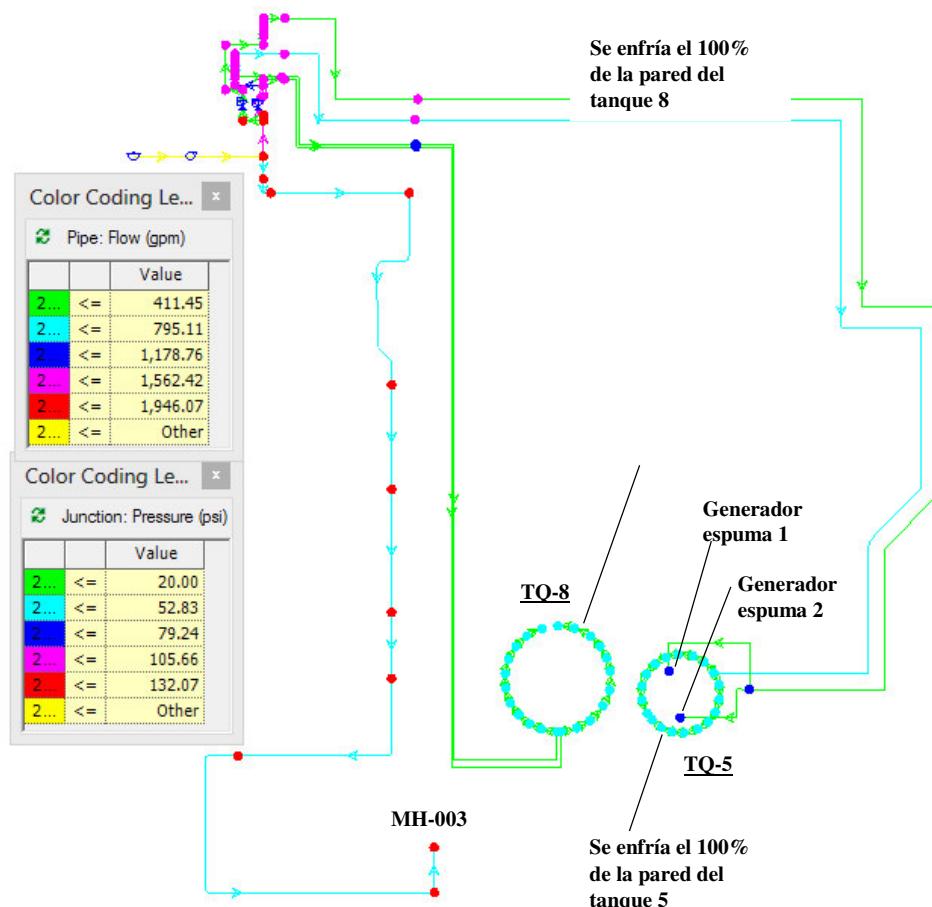
Figura 6.23: Solución óptima para el escenario 2



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-5) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de

agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.24).

Figura 6.24: Simulación optimizada para el escenario 2



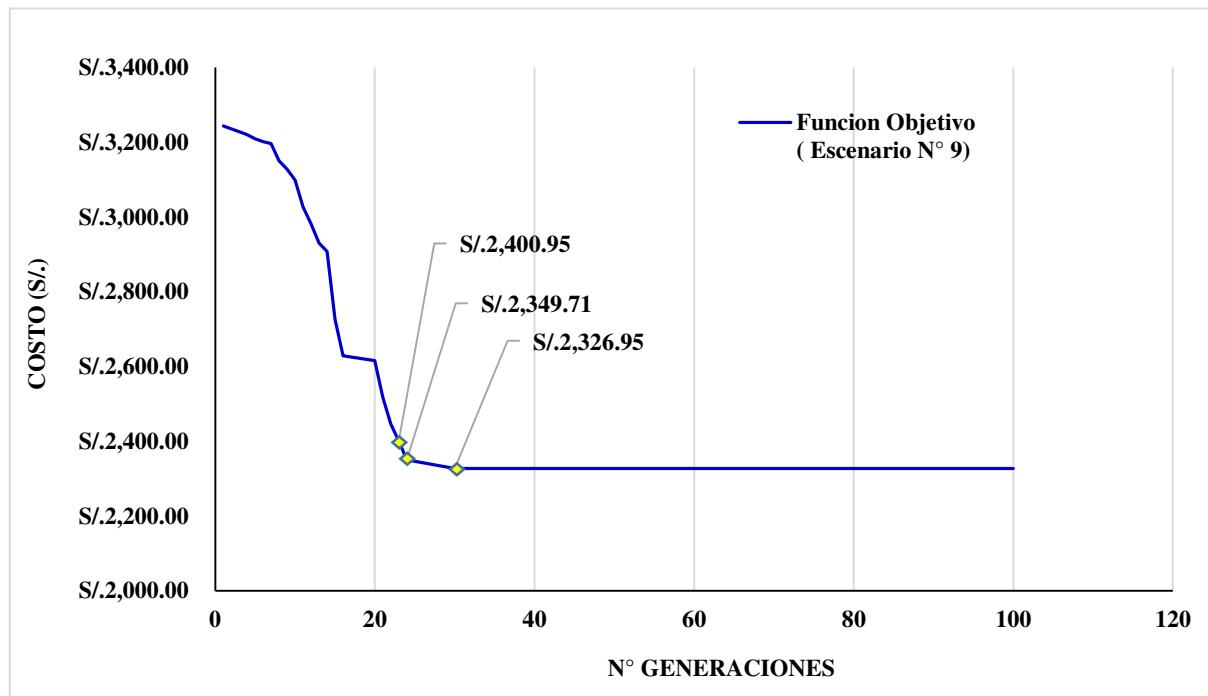
En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se obtuvo que la presión simulada en el Generador de espuma 1 y 2 ubicados en el TQ-5 es de 56.54 psi resultando mayor a la presión mínima requerida de 20.62 psi. En relación al caudal real simulado que emite el Generador 1 y 2 es de 37.60gpm resultando mayor al caudal teórico de 22.70 gpm. Asimismo se logra obtener que los rociadores del tanque TQ-5 trabajan con presiones entre

24.65 psi y 52.83 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-5 es de 510.20gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 376.81gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MH-003 de 124.68psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es de 558.31gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

Respecto a los resultados de la simulación para los rociadores que enfriá el 100% de la pared del tanque TQ-8, estas trabajan con presiones superiores a 27.89psi y menores a 52.83 psi, el caudal real simulado que ingresa a la sección del anillo activado del TQ-8 es igual a 802.37gpm, este valor resulta superior al caudal teórico de 687.16gpm.

6.9 Escenario N°9: Incendio en tanque TQ-30

Figura 6.25: Evolución de AG para el escenario N°9



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en

donde se observa que la función objetivo converge rápidamente en pocas generaciones al valor óptimo, esto sucede porque para este escenario N°9 de incendio solamente se busca los diámetros óptimos de 3 tuberías. Nótese que luego de las 23 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.2,400.95 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 25 sigue resultando un costo similar de S/. 2,349.71 soles y desde la generación 30 en adelante obtiene un costo constante de S/.2,326.95 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generaciones va creciendo, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.2,326.95 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.17 se puede apreciar que la tubería de acero P-658 puede tomar un diámetro nominal de 1 ½" (solucion1), 2" (solución 2) o 2 ½" (solución 3) ya que según la Tabla 6.18 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.17: Tres mejores soluciones de la red de tuberías en el escenario 9

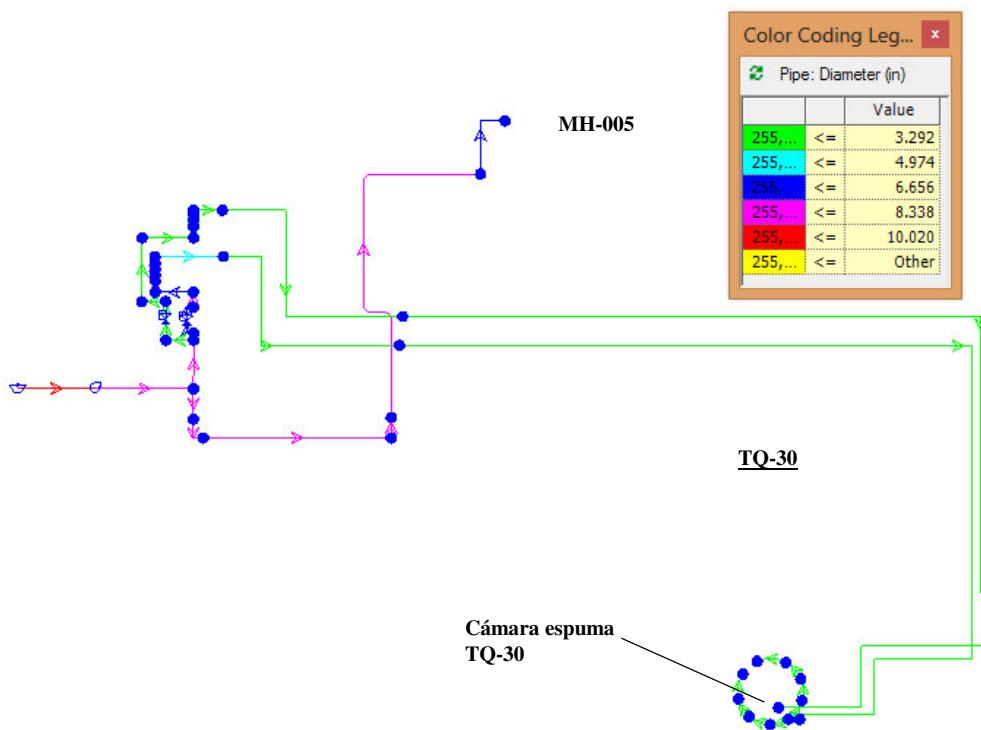
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-690	Acero	120	1.61	1,853.34	1.61	1,853.34	1.61	1,853.34
P-671	Hdpe	150	1.917	400.93	1.917	400.93	1.917	400.93
P-658	Acero	120	1.61	72.68	2.067	95.44	2.469	146.68
COSTO TOTAL			S/. 2,326.95		S/. 2,349.71		S/. 2,400.95	

Tabla 6.18: Resultados de simulación para el escenario 9

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
Cámara TQ-30	6.07	100	45.15	0	45.67	0	45.8	0

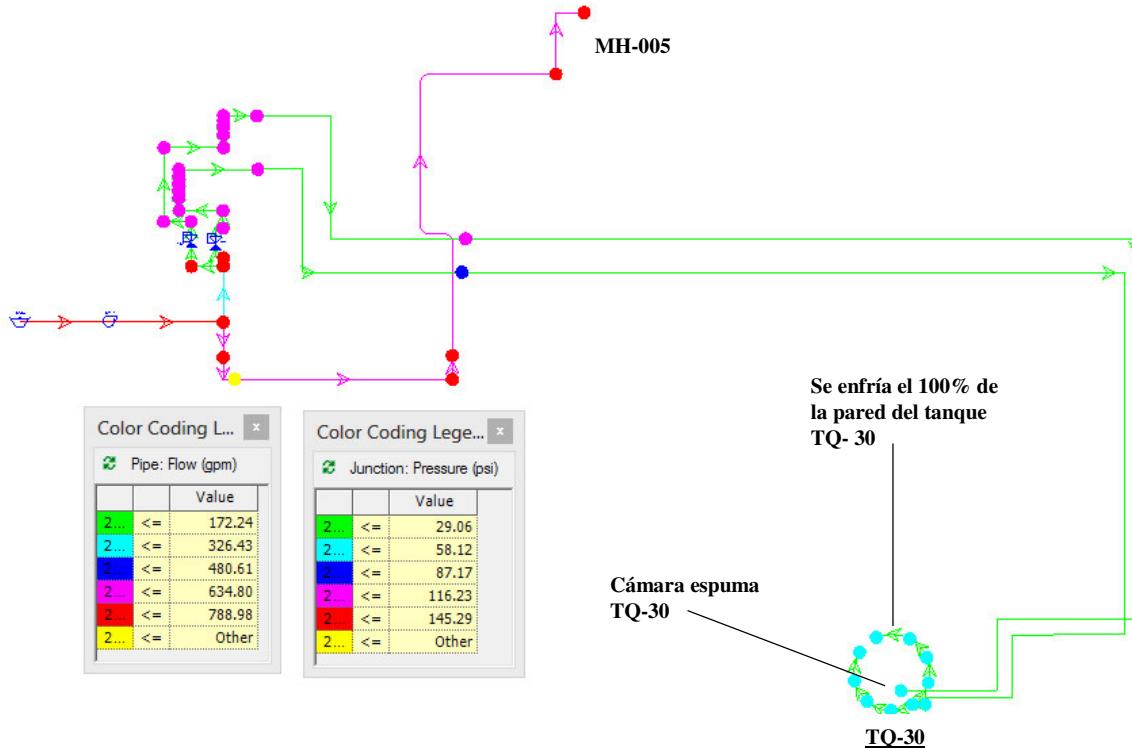
El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°9 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.26):

Figura 6.26: Solución óptima para el escenario 9



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en la zona del tanque incendiado (TQ-30) considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares que cubren los anillos de enfriamiento son los rociadores y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.27).

Figura 6.27: Simulación optimizada para el escenario 9

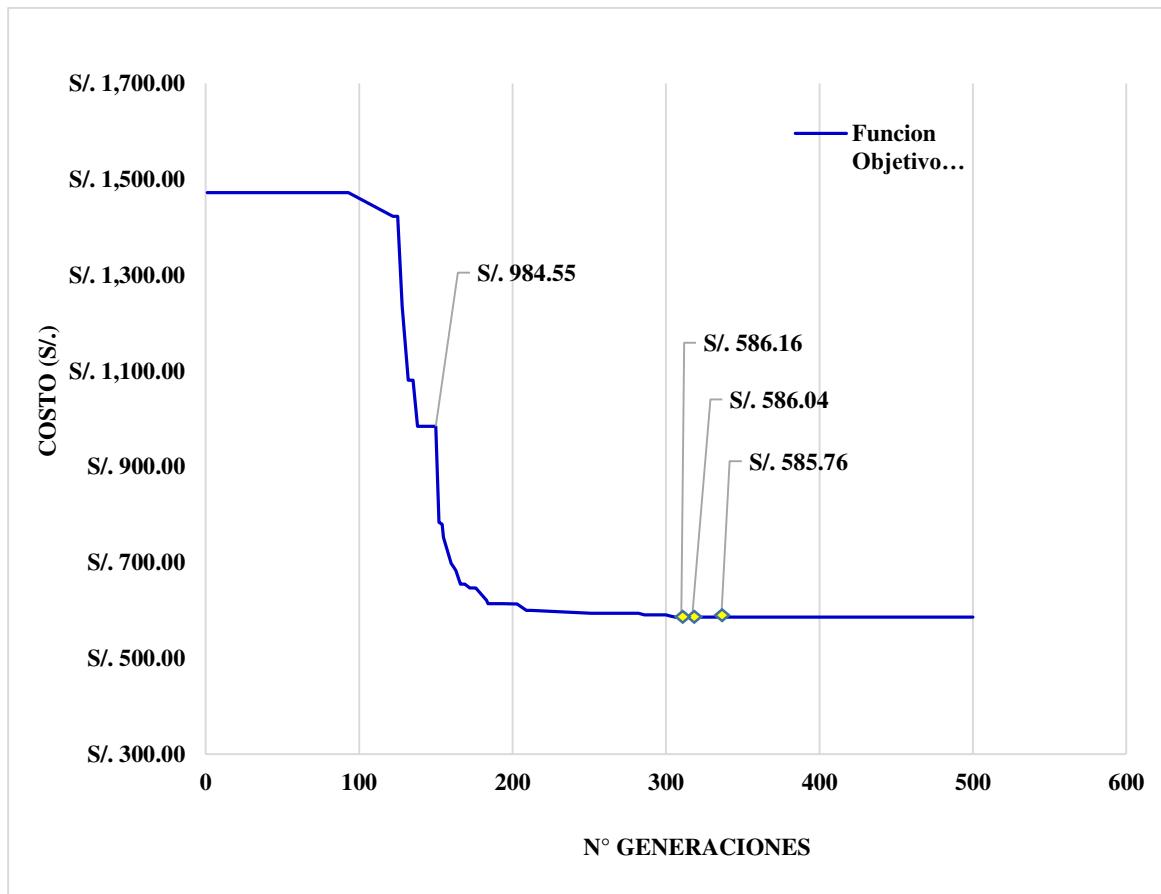


En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se puede ver que la presión simulada en la cámara de espuma ubicada en el TQ-30 se comporta alrededor de 45.15 psi y que resulta mayor a la presión mínima requerida de 6.07 psi. En relación al caudal real simulado que emite este dispositivo, se obtuvo un valor de 53.75 gpm resultando mayor al caudal teórico de 19.72 gpm. Asimismo se logra visualizar que los rociadores del tanque TQ-30 trabajan con presiones entre 31.84 psi y 58.12 psi, el caudal real que ingresa al anillo activado en el tanque TQ-30 es de 144.59gpm, este valor resulta superior al caudal teórico requerido de 130.05gpm. Por otra parte podemos observar que la presión en el MH-005 de 139.54 psi supera la presión mínima de 100 psi y el caudal real que emite es de 590.63gpm superando así el caudal teórico de 500 gpm.

En efecto, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento y espuma para este escenario.

6.10 Escenario N°10: Incendio en cuarto de bombas

Figura 6.28: Evolución de AG para el escenario N°10



La gráfica anterior muestra el comportamiento entre el número de generaciones versus el costo (soles) que representa la evolución de los Algoritmos Genéticos (AG), en donde se observa que la función objetivo converge al valor óptimo para este escenario de incendio. De la misma grafica se obtiene que luego de las 306 generaciones (iteraciones) los costos se aproximan al valor de S/.586.16 soles sin ninguna mejora considerable, dado que hasta la generación 326 sigue resultando un costo similar de S/.586.04 soles y desde la generación 336 en adelante obtiene un costo constante de S/.585.76 soles, lo que demuestra una tendencia muy clara a medida que el número de generación va aumentando, obsérvese también que la diferencia económica entre estas tres mejores soluciones es irrelevante, por lo

que bajo este criterio de convergencia se elige como solución óptima el costo de S/.585.76 soles, aunque por lo anterior se podría elegir cualquiera de las tres soluciones como el óptimo. Por otro lado, si se compara los resultados que se muestran en la Tabla 6.19 se puede apreciar que la tubería de acero P-192 puede tomar un diámetro nominal de $1 \frac{1}{4}$ " (solucion1), $1 \frac{1}{2}$ " (solución 2) o $1 \frac{1}{4}$ " (solución 3) y la tubería de acero P-194 también puede tomar un diámetro nominal de 1" (solución 1), 1" (solución 2) o $1 \frac{1}{4}$ " (solución 3) ya que según la Tabla 6.20 con cualquiera de esos diámetros satisface las restricciones hidráulicas impuestas.

Tabla 6.19: Soluciones de la red de tuberías en el escenario 10

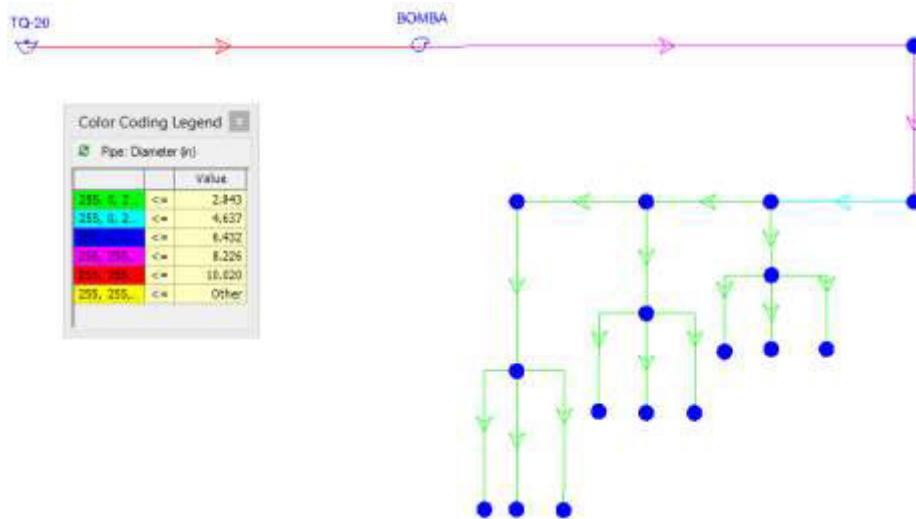
Tubería	Material	Hazen-Williams C	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)	Diámetro (in)	Costo (S/.)
P-181	Acero	120	2.469	73.34	2.469	73.34	2.469	73.34
P-182	Acero	120	2.067	71.58	2.067	71.58	2.067	71.58
P-183	Acero	120	2.469	3.67	2.469	3.67	2.469	3.67
P-184	Acero	120	2.469	3.67	2.469	3.67	2.469	3.67
P-185	Acero	120	2.469	3.67	2.469	3.67	2.469	3.67
P-186	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-187	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-188	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-189	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-190	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-191	Acero	120	1.049	35.03	1.049	35.03	1.049	35.03
P-192	Acero	120	1.38	1.53	1.61	1.82	1.38	1.53
P-193	Acero	120	1.049	1.13	1.049	1.13	1.049	1.13
P-194	Acero	120	1.049	1.13	1.049	1.13	1.38	1.53
P-470	Acero	120	3.068	215.87	3.068	215.87	3.068	215.87
COSTO TOTAL			S/. 585.76		S/. 586.04		S/. 586.16	

Tabla 6.20: Resultados de simulación para el escenario 10

Elemento	Presión mínima requerida (psi)	Presión máxima requerida (psi)	Solución 1		Solución 2		Solución 3	
			Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)	Presión simulada (psi)	Violación (psi)
J-181	31.51	175	100.3	0	100.3	0	100.29	0
J-180	31.51	175	122.73	0	122.82	0	122.72	0
J-179	31.51	175	100.3	0	100.3	0	100.29	0
J-183	31.51	175	92.26	0	92.26	0	92.26	0
J-182	31.51	175	112.54	0	112.54	0	112.53	0
J-184	31.51	175	92.26	0	92.26	0	92.25	0
J-185	31.51	175	86.32	0	86.32	0	86.3	0
J-186	31.51	175	105.36	0	105.36	0	105.76	0
J-187	31.51	175	86.32	0	86.32	0	86.3	0

El conjunto de diámetros asociados a la solución óptima (solución 1) para el escenario N°10 bajo el punto de vista hidráulico y económico, se pueden mostrar de la siguiente manera (ver Figura 6.29):

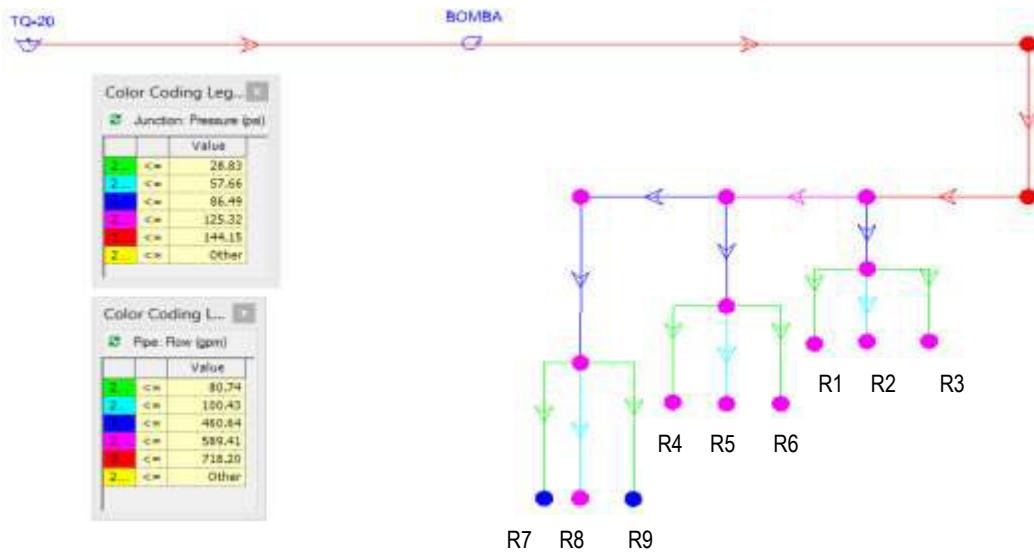
Figura 6.29: Solución óptima para el escenario 10



En la siguiente figura se puede visualizar los resultados de la simulación en el cuarto de bombas incendiado considerando los diámetros óptimos. Los nodos circulares indicados mediante letras y números representan los rociadores automáticos (R_i) y la presión (psi) que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra. El caudal real

simulado (gpm) de agua y espuma en las tuberías se puede analizar a través de la escala de colores en los elementos líneas (Ver figura 6.30).

Figura 6.30: Simulación optimizada para el escenario 10



En este caso los resultados de la simulación fueron positivos, se obtuvo que las presiones simuladas en los rociadores automáticos R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9 es de 100.30 psi, 122.73 psi, 100.30 psi, 92.26 psi, 112.54 psi, 92.26 psi, 86.32 psi, 105.36 psi y 86.32 psi respectivamente, estas presiones resultan mayores a la presión mínima requerida de 31.51 psi. En relación al caudal real simulado que emite R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9 se obtuvo valores de 80.12 gpm, 88.63 gpm, 80.12 gpm, 76.84 gpm, 84.87gpm, 76.84 gpm, 74.33 gpm, 82.11gpm y 74.33 gpm respectivamente resultando mayor al caudal teórico de 34.44gpm. En consecuencia, los valores de presión y caudal obtenidos permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento para este escenario.

CONCLUSIONES

- i. Se logró determinar un diseño hidráulico optimizado del sistema de protección contra incendio para la planta de combustibles terminal Juliaca a través una metodología basada en los Algoritmos genéticos del software WaterCAD, obteniendo el conjunto de diámetros óptimos que generaron el cumplimiento de restricciones hidráulicas a un costo mínimo de S/. 215 781,24 soles para la instalación de toda la red de tuberías.
- ii. Respecto a la estimación de los diámetro óptimos de la red de tuberías de enfriamiento y sofocación, se determinó que el diámetro óptimo de la red principal que alimenta a los monitores e hidrantes es de 8 pulgadas y que la tubería de aspiración e impulsión tienen un diámetro óptimo de 10 pulgadas y 8 pulgadas respectivamente. De igual manera se estimó que los diámetros óptimos de las redes de tuberías del sistema de enfriamiento y espuma son menores o iguales a 6 pulgadas. Asimismo se comprobó que los diámetros óptimos de los anillos del TQ-1, TQ-5, TQ-6, TQ-7, TQ-8, TQ-9, TQ-10, TQ-11, TQ-30 son de 2", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 2 ½", 3", 2 ½" respectivamente.
- iii. En relación a los resultados de presión y caudal en cada escenario de incendio, se obtuvieron que las presiones en los rociadores, monitores, hidrantes, cámara y generadores de espuma son superiores a la presión mínima y menores a la presión máxima establecidas. De igual manera los caudales obtenidos en estos dispositivos estuvieron por encima del caudal teórico estimado, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema de espuma y enfriamiento en cada escenario de incendio.

- iv. En cuanto al análisis y evaluación de los diferentes escenarios de incendio, se obtuvo que el escenario critico de mayor demanda de agua contra incendio requerido por el sistema corresponde al escenario N°6 (Incendio en el tanque TQ-9) con un caudal de 2 822,10 gpm.
- v. En relación a la fuente de entrega del sistema de protección contra incendio, se determinó que la capacidad mínima de agua requerida en el TQ-20 para atender cualquiera de los 16 escenarios de incendio en la Planta Juliaca es de 1 925,24 m³ y que el tanque Bladder existente de 300 galones de capacidad cubre la mínima demanda de espuma equivalente a 145 galones (0,55 m³).

RECOMENDACIONES

- i. Se recomienda efectuar el mismo trabajo del diseño del sistema de protección contra incendio de la planta Juliaca utilizando un método diferente al desarrollado en este trabajo con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en esta investigación, a fin de determinar el método que genere el menor costo de instalación.
- ii. Extender el estudio con una metodología diferente para la búsqueda de los diámetros óptimos.
- iii. Analizar con mayor profundidad el comportamiento de las presiones y caudales a lo largo del tiempo de incendio (Análisis de flujo no permanente), en los dispositivos como; los rociadores, monitores, hidrantes, cámara y generadores de espuma.
- iv. Analizar la mayor cantidad de escenarios de incendio que sean necesarios a la hora de estimar los diámetros óptimos de un sistema de protección contra incendio.
- v. Analizar el comportamiento los niveles de agua en el TQ-20 requerida para atender cualquier escenario de incendio a lo largo del tiempo de funcionamiento del sistema de enfriamiento que es de 3 horas. Del mismo modo se recomienda analizar dicho comportamiento en los primeros 30 minutos donde se ejecuta la extinción del fuego mediante el sistema de sofocación.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliográficos

- Aguirre, M. & Grimaldo, L. (2004). *Diseño hidráulico de sistemas contra incendio mediante simulación numérica* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Calabro,H., Godoy,L., y Jaca,R.(2014). *Inestabilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico durante un incendio*.ASAEE,11(1),7-28
- Castellanos, H. (2018). *Pre-Diseño de la red contra incendio del edificio Alberto E. Ariza de la Universidad Santo Tomas* (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C.
- Castellanos, J. (2007). *Evaluación hidráulica del sistema de espuma contra incendio de la estación principal d de Sincor* (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Cedillo, J. (2011). *Diseño del sistema de bombeo de agua contra incendio para una instalación petrolera* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, D.F, México.
- Florián, S. (2017). *Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable-RDAP-del municipio de Madrid, Cundimarca* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- García, M. (2006). *Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas* (Tesis pregrado). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Civil, Cartagena.
- Gilberto,S. (1997). *Hidráulica General*. México: Limusa.
- Giles,R. (1973). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. México: McGraw-Hill.
- Gonzales, M. (2013). *Optimización de redes hidráulicas mediante aplicación de algoritmos genéticos y de recocido simulado en programas comerciales* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería "JULIO GARAVITO", Bogotá.
- Goñi, S (2017). *Diseño y optimización de la red de abastecimiento del municipio de Beire* (Tesis de pregrado).E.T.S de Ingeniería Industrial, Informática y Telecomunicaciones, Pamplona.
- López, C. (2003). *Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable de Mínimo costo con algoritmo genético* (Tesis de grado). Universidad de los Andes, Bogotá.
- Lira, J. (2009). *Adecuación del sistema contra incendios de la planta MPE-1 en PDVSA-Morichal al sur del estado Monagas* (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Barcelona.

Martínez, R. (2012). *Diseño de sistema contra incendio en plantas industriales segun normas internacionales y locales* (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

Mora, D. (2012). *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Quevedo, V. (2017). *Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo strength pareto evolutionary algorithm y su efectividad en el diseño de redes de agua potable*. Caso: Sector Viñani-T-Tacna (Tesis de pregrado). Universidad Privada de Tacna, Perú.

Sánchez, I. (2016). *Aplicación de Algoritmos genéticos para la optimización del corte de material* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos*. Colombia: McGraw-Hill.

Información electrónica

JAIME MOCADA. (s.f). *Protección contra incendios para el sector petrolero protección contra incendios para el sector petrolero*.2019, recuperado de NFPA Sitio web: <http://www.nfpajla.org/columnas/punto-de-vista/392-proteccion-contra-incendios-para-el-sector-petrolero>

Kampa, S. (2012). *Using Darwin Designer to design pipes in WaterGEMS*. Mayo 20,2018, recuperado de Bentley communities sitio web: <https://communities.bentley.com>

ANEXOS

ANEXO 1

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MÍNIMOS DEL SISTEMA DE ESPUMA Y ENFRIAMIENTO

SISTEMA DE ESPUMA

Tabla A.1 – Estimación de parámetros mínimos - Sistema de espuma

TAG	PRODUCTO	TIPO DE TECHO	ALTURA (H)	DIÁMETRO (D)	GENERADORES O CÁMARAS DE ESPUMA (N _{cam})	RATE (R)	ÁREA INCENDIADA		CAUDAL REQUERIDO	TIEMPO DE APLICACIÓN (T _{apl})	DOTACIÓN DE ESPUMA (V _{esp})	CAUDAL x CÁMARA	MODELO CÁMARA ESPUMA	FACTOR K	PRESIÓN REQUERIDA (P _{req})
							m	m							
gpm/pie ²	m ²	pie ²	gpm	min	gal	gpm	GPM/PSI ^{1/2}	psi							
TQ-1	Diésel B5	Techo Fijo	9.19	8.51	1	0.1	56.88	612.24	61.22	30	55	61.22	MCS-9	9	46,24
TQ-5	Etanol	Techo Flotante Interno c/ Foam Dam	9.22	8.06	2	0.3	14.06	151.36	45.40	20	27	22.70	SPS-9	5	20,60
TQ-6	Diésel B5	Techo Fijo	11.06	9.58	1	0.1	72.08	775.87	77.59	30	70	77.59	MSC-9	12	41,77
TQ-7	Diésel B5	Techo Fijo	11.62	9.61	1	0.1	72.53	780.74	78.07	30	70	78.07	MCS-9	12	42,30
TQ-8	Diésel B5	Techo Fijo	11.00	12.32	1	0.1	119.21	1283.16	128.32	30	115	128.32	MCS-17	20	41,13
TQ-9	Diésel B5	Techo Fijo	11.25	13.82	1	0.1	150.01	1614.64	161.46	30	145	161.46	MCS-17	24	45,23
TQ-10	Gasolina 84	Techo Flotante Interno c/ Foam Dam	14.12	14.42	2	0.3	26.05	280.40	84.12	20	50	42.06	SPS-9	8	27,62
TQ-11	Gasolina 84	Techo Flotante Interno c/ Foam Dam	13.50	16.0	3	0.3	29.03	312.36	93.72	20	56	31.24	SPS-9	5	39,03
TQ-30	Alcohol Carburante	Sabana Flotante	5.31	4.83	1	0.1	18.32	197.22	19.72	55	33	19.72	MCS-9	8	6,07

FORMULAS USADAS:

- $A_{inc} = \frac{\pi}{4} D^2$; Dónde D es el diámetro del tanque incendiado en (m), A_{inc} es el área incendiada en (m² y pie²).
- $Q_{req} = R \times A_{inc}$; Dónde R es el rate de descarga en el tanque incendiado en (GPM/pie²), A_{inc} es el área incendiada en (m² y pie²), Q_{req} es el caudal requerido de solución agua-espuma expresado en (GPM).
- $V_{esp} = T_{apl} \times Q_{req}$; Dónde T_{apl} es el tiempo de aplicación del concentrado de espuma en (min), Q_{req} es el caudal mínimo requerido de solución agua-espuma en (GPM), V_{esp} es el volumen de concentración espuma (Galones)
- $Q_{cam} = \frac{Q_{req}}{N_{cam}}$; Dónde N_{cam} es el número de cámaras generadoras de espuma por tanque, Q_{req} es el caudal mínimo requerido de solución agua-espuma en (GPM).
- K es el factor de descarga expresado en GPM/PSI^{1/2}, es definido por medio de una interpolación considerando la Tabla 8.1.3 proporcionado por los fabricantes.
- $P_{req} = \left(\frac{Q_{cam}}{K}\right)^2$; Q_{cam} es el caudal de una cámara generadora de espuma expresado en (GPM), P_{req} es la presión mínima requerida por la cámara espuma expresada en (PSI)

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Tabla B.1 – Cálculo de parámetros iniciales - Sistema de enfriamiento

TK	PRODUCTO	H	D	PERIMETRO	ANILLO DE ENFRIAMIENTO													
					ÁREA ENFRIADA (A _{enf})		RATE (R)	CAUDAL TOROIDAL (Q _{tor})		N _{asp}	N _{anillo}	LONG - ARCO ENTRE ASP (L _{sep})	θ DEFLECTOR	CAUDAL X ASP (Q _{asp})	PRESION MÍNIMA	FACTOR K TEÓRICO (K _{Teo})	FACTOR K COMERCIAL (K _{Com})	PRESION MÍNIMA REQUERIDA (P _{req})
m	m	m	m	m ²	pie ²	gpm/pie ²	gpm	m ³ /s			m		gpm	PSI	gpm/psi ^{0.5}	gpm/psi ^{0.5}	psi	
TQ-1	Diésel B5	9.19	8.51	31.76	245.83	2645.11	0.15	396.77	0.03	14	1	2.27	125°	28.34	20.00	6.34	7.20	20.00
TQ-5	Etanol	9.22	8.06	30.35	233.46	2512.05	0.15	376.81	0.02	18	1	1.69	140°	20.93	20.00	4.68	5.60	20.00
TQ-6	Diésel B5	11.06	9.58	35.12	332.87	3581.65	0.15	537.25	0.03	18	1	1.95	125°	29.85	20.00	6.67	7.20	20.00
TQ-7	Diésel B5	11.62	9.61	35.22	350.82	3774.78	0.15	566.22	0.04	18	1	1.96	125°	31.46	20.00	7.03	7.20	20.00
TQ-8	Diésel B5	11.00	12.32	43.73	425.75	4581.06	0.15	687.16	0.04	20	1	2.19	125°	34.36	20.00	7.68	7.20	22.77
TQ-9	Diésel B5	11.25	13.82	48.44	488.44	5255.60	0.15	788.34	0.05	22	1	2.20	140°	35.83	20.00	8.01	7.20	24.77
TQ-10	Gas 84	14.12	14.42	50.33	639.66	6882.75	0.15	1032.41	0.07	22	2	2.32	125°	23.46	20.00	5.25	4.10	32.74
TQ-11	Gas 84	13.50	16.0	55.29	678.58	7301.56	0.15	1095.23	0.07	24	2	2.33	140°	22.82	20.00	5.10	4.10	30.97
TQ-30	Alcohol Carburante	5.31	4.83	20.20	80.57	866.97	0.15	130.05	0.01	8	1	2.53	125°	16.26	20.00	3.63	3.20	29.36

Nota:

- De acuerdo al estándar de oiltanking BS-001-1 y BS-002-2 los tanques que tienen una altura mayor a 12.0 m contarán con 2 anillos de enfriamiento

FORMULAS USADAS:

- $A_{enf} = \pi D x H$; Dónde D es el diámetro del tanque incendiado en (m), H es la altura del tanque incendiado, A_{enf} es el área enfriada del tanque en (m² y pie²).
- $Q_{tor} = A_{enf} x R$; Dónde A_{enf} es el área enfriada del tanque en (pie²), R es el rate de aplicación del toroide de enfriamiento en (GPM/pie²), Q_{tor} es el caudal mínimo que requiere el toroide de enfriamiento expresado en (GPM).
- N_{asp} ; es definido de forma manual mediante distribución geométrica en CAD, considerando la cobertura de un aspersor
- $L_{sep} = \frac{\text{Perímetro}}{N_{asp}}$; Dónde el perímetro es expresado en (m), N_{asp} es el número de aspersores en el toroide
- $Q_{asp} = \frac{Q_{tor}}{N_{asp}}$; Dónde el Q_{tor} es el caudal mínimo que requiere el toroide en (GPM), N_{asp} es el número de aspersores en el toroide; Q_{asp} es el caudal de un aspersor expresado en (GPM).
- $K_{Teorico} = \frac{Q_{asp}}{\sqrt{P_{min}}}$; Donde Q_{asp} es el caudal de un aspersor expresado en (GPM), P_{min} es la presión mínima requerida por la NFPA 15, sección 8.1.2., K_{Teorico} es el factor k de descarga de un aspersor.
- $P_{req} = \left(\frac{Q_{asp}}{K_{com}}\right)^2$; Dónde Q_{asp} es el caudal de un aspersor en (GPM), K_{com} es el factor k de descarga comercial, P_{req} es la presión mínima requerida por el aspersor hidráulicamente más desfavorable usando el factor k comercial.

ANEXO 2
PERFOMANCE DE LA MOTOBOMBA CONTRA INCENDIO
(TERMINAL JULIACA)



PRUEBAS DE FLUJO:

Prueba de Performance de la bomba Caudal vs Presion:

Caudal - GPM	Presion des -PSI	Presion suc-PSI	RPM-nominal	PSI		°C Motor	PSI Intercambiador	PSI Combustible
				Presión Aceite	°C			
0	143	8	2112	74	78	21	---	---
1000	135	7	2108	74	78	20	---	---
1500	128	4	2105	74	78	19	---	---
2000	120	2	2100	74	78	18	---	---
3000	85	-10	2095	74	78	13	---	---

Corregido a	2100	DATOS PLACA DE BOMBA NOMINAL	
Caudal - GPM	Pres des Neta	Caudal - GPM	Presion (PSI)
0.00	133.47	0	127
996.20	128.00	2000	110
1496.44	124.00	3000	85
2000.00	118.00		
3007.16	95.00		