

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE MEZCLADORES  
AIRE-GAS COMBUSTIBLE PARA UN QUEMADOR DE  
PRE-MEZCLA DOMÉSTICO DE 1,7 kW**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,  
que presenta el alumno:**

**Álvarez Olivares, José Alexis**

**ASESOR: Rojas Chávez, Freddy Jesús**

**Lima, Junio del 2018**

## RESUMEN

El trabajo desarrollado presenta el diseño energético y la evaluación experimental de once mezcladores de aire-gas combustible para un quemador de premezcla doméstico de 1,7 kW, usando gas natural o gas licuado de petróleo (GLP) como combustible.

Se busca contribuir con una investigación centrada en los diferentes modelos que puede poseer un mezclador para quemadores de pre-mezcla con gas inductor en una cocina a gas, así como en los efectos que pueden generarse debido a las disimilitudes en sus diseños. Para lo cual se realizaron ensayos con los mezcladores propuestos en un módulo de pruebas, siguiendo lo establecido por la norma técnica chilena NCh927/1, variando la distancia entre el inyector y el mezclador, así como la correspondiente a la hornilla del quemador respecto al recipiente de pruebas (olla con agua). Por lo tanto, la elaboración del presente trabajo se fundamenta en su aporte experimental al reconocimiento de las consecuencias que diversos cambios en las características de los mezcladores pueden provocar, centrándose solo en el rendimiento térmico y las emisiones de monóxido de carbono (CO) como producto de la combustión exenta de aire y vapor de agua (combustión neutra), denominado como monóxido de carbono neutro (CO)<sub>N</sub>.

Para esto se requirió reconocer cuáles son las condiciones de trabajo en las que las cocinas domésticas suelen operar en Lima, así como las características físico-químicas de los combustibles a utilizar, lo que permitió determinar las dimensiones de los mezcladores. Posteriormente, se prosiguió con la fabricación de los mezcladores planteados. De este modo, como resultado, se obtuvieron once diferentes modelos de mezcladores; siendo cinco de ellos diseñados para su uso solo con gas licuado de petróleo, otros cinco solo para gas natural y el último para ambos gases combustibles.

Finalmente, se prosiguió con las pruebas experimentales correspondientes, cuyos resultados permitieron la elaboración de los respectivos gráficos para los diferentes mezcladores propuestos, permitiendo evaluar las condiciones que ofrecen los mejores resultados, para luego compararlos con los límites establecidos por la norma NCh927/1.

Según lo observado, un aspecto influyente en el arrastre de aire es la distancia que existe entre el inyector y el mezclador; de manera que al alejar el inyector, la cantidad de aire en la mezcla se incrementó; permitiendo una reducción del porcentaje de monóxido de carbono neutro (CO)<sub>N</sub>.

Además, se tiene que los mezcladores desarrollados para gas natural permiten obtener mayores rendimientos térmicos y menores valores de monóxido de carbono neutro, a comparación de los fabricados para gas licuado de petróleo, cumpliendo con los límites establecidos por la norma NCh927/1 en algunos casos. De tal forma que el mezclador GN-5 es el único que permite cumplir los requerimientos de rendimiento y emisiones.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : **DISEÑO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE MEZCLADORES AIRE-GAS COMBUSTIBLE PARA UN QUEMADOR DE PREMEZCLA DOMÉSTICO DE 1,7 KW**

ÁREA : Energía  $\neq$  40 Z

PROPUESTO POR : Ing. Freddy Jesús Rojas Chávez

ASESOR : Ing. Freddy Jesús Rojas Chávez

TESISTA : José Alexis Álvarez Olivares

CÓDIGO : 20090429

FECHA : 18-05-16



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

Actualmente, debido al creciente consumo de combustible en el mundo, se hace de creciente interés la reducción del gasto de energía en todos los sectores. En el Perú, con respecto al sector residencial, según el Ministerio de Energía y Minas, la cocina a gas es el equipo más representativo en cuanto a consumo de energía térmica se refiere (Guía de Orientación de Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético, 2008).

En ese sentido, se requiere un estudio que ofrezca mayor información sobre cómo obtener un mayor beneficio del combustible en las cocinas domésticas, lo que significa una reducción de su consumo así como de las emisiones generadas por los procesos de combustión.

Por lo tanto, en el presente trabajo se realiza un estudio teórico y experimental. Se realiza el diseño, se fabrica y se evalúa experimentalmente distintos mezcladores para quemadores de premezcla domésticos para una potencia térmica de 1,7 kW basándose en los procedimientos de ensayos de la norma NCh 927/1, usando como combustible gas natural y gas licuado de petróleo. Haciendo énfasis en el rendimiento térmico y las emisiones de monóxido de carbono neutro generadas, y comparando los resultados con los límites establecidos por la norma anteriormente mencionada.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE MEZCLADORES  
AIRE-GAS COMBUSTIBLE PARA UN QUEMADOR DE  
PREMEZCLA DOMÉSTICO DE 1,7 KW**

Introducción

1. Marco Teórico
2. Diseño de Mezcladores de Premezcla
3. Metodología Experimental
4. Resultados y Análisis

Observaciones y Recomendaciones (opcional)


Conclusiones

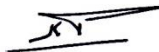
Bibliografía

Anexos

Planos

*Máximo: 100 páginas*

  
Ing. Freddy Jesús Rojas Chávez  
Asesor



## ÍNDICE

RESUMEN .....	i
LISTA DE SIMBOLOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
METODOLOGÍA .....	4
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Introducción a la Combustión.....	8
1.3. Combustión Estequiométrica .....	9
1.4. Exceso de aire .....	9
1.5. La llama .....	10
1.6. Productos de combustión.....	11
1.7. El Quemador.....	12
1.7.1. Quemadores de mezcla previa .....	13
1.7.1.1. Quemadores de mezcla previa por inducción atmosférica .....	14
1.8. Arrastre del fluido inductor .....	15
1.9. Sistema de Inducción.....	16
1.10. Flujo sónico y subsónico .....	18
1.11. Gases Combustibles .....	20
1.11.1. Gas licuado de petróleo (GLP).....	20
1.11.2. Gas Natural .....	21
CAPÍTULO 2: DISEÑO DE MEZCLADORES DE PRE-MEZCLA .....	23
2.1. Elección del Inyector .....	23
2.2. Diseño del Mezclador.....	30
2.2.1. Propuesta H.Jones.....	30
2.2.2. Propuesta D.Fulford.....	34
2.2.3 Propuesta C. Lagarza .....	36
2.3. Características de lo mezcladores diseñados.....	38

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	39
3.1. Descripción de Procedimientos de Ensayos.....	39
3.2. Proceso para Análisis de Rendimiento Térmico .....	44
3.2.1. Instrumentación para Análisis Térmico.....	46
3.3. Proceso de análisis de emisión de monóxido de carbono neutro .....	48
3.4. Condiciones Ambientales.....	50
3.5. Análisis estadístico en ámbito experimental.....	50
3.5.1. Incertidumbre de Lectura .....	51
3.5.2. Incertidumbre por Errores Externos .....	55
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	57
4.1. Evaluación de los mezcladores con GLP .....	58
2.1.1. Mezclador GLP-1 .....	58
2.1.2. Mezclador GLP-2 .....	60
2.1.3. Mezclador GLP-3 .....	62
2.1.4. Mezclador GLP-4 .....	64
2.1.5. Mezclador GLP-5 .....	66
2.1.6. Mezclador GLP-6 .....	68
2.2. Evaluación de los mezcladores con gas natural.....	71
2.2.1. Mezclador GN-1 .....	71
2.2.2. Mezclador GN-2.....	72
2.2.3. Mezclador GN-3.....	74
2.2.4. Mezclador GN-4.....	76
2.2.5. Mezclador GN-5.....	78
2.2.6. Mezclador GN-6.....	80
2.3. Comparación de Resultados de Rendimiento Térmico.....	83
2.4. Comparación de Resultados de Porcentaje de Emisiones de CO <sub>n</sub> .....	84
CONCLUSIONES .....	87
BIBLIOGRAFÍA .....	90

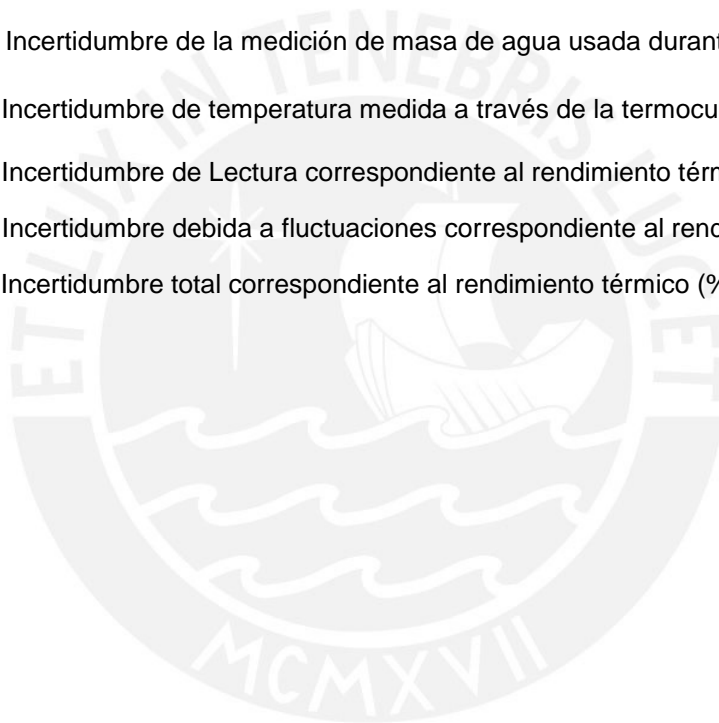
## LISTA DE SIMBOLOS

$V$	:	Velocidad del fluido (m/s)
$D_F$	:	Variable de longitud presente en el trayecto del fluido (m)
$\theta$	:	Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )
$Re$	:	Número de Reynolds
$\dot{m}_\infty$	:	Masa del gas circulante (kg/s)
$\dot{m}_g$	:	Masa del fluido (kg/s)
$\rho_\infty$	:	Densidad del aire circulante ( $kg/m^3$ )
$\rho_g$	:	Densidad del gas combustible ( $kg/m^3$ )
$d_i$	:	Diámetro del inyector (mm)
$L_m$	:	Longitud del mezclador (mm)
$D_m$	:	Diámetro de la garganta del mezclador (mm)
$c$	:	Velocidad del sonido (m/s)
$Ma$	:	Número de Mach
$A$	:	Área del flujo ( $mm^2$ )
$P_g$	:	Presión manométrica del flujo (mbar)
$PCI$	:	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
$k$	:	Relación de calores específicos
$MW$	:	Peso Molecular (kg/kmol)
$s$	:	Densidad Relativa del gas combustible
$P_{req}$	:	Potencia requerida en el quemador (kW)
$\dot{Q}_g$	:	Caudal del gas combustible (l/min)
$P_c$	:	Ratio de presión crítica
$P_{atm}$	:	Presión atmosférica (mbar)
$P_A$	:	Presión absoluta del gas (mbar)
$T_{amb}$	:	Temperatura ambiente (K)

$z$	:	Altura sobre el nivel del mar (m)
$P_g$	:	Presión manométrica del gas correspondiente (mbar)
$A_e$	:	Área de salida del orificio del inyector ( $\text{mm}^2$ )
$M_e$	:	Número de Mach a la salida del inyector
$C_e$	:	Velocidad del sonido del gas combustible a la salida del inyector (m/s)
$T_e$	:	Temperatura del gas combustible a la salida del inyector (K)
$\bar{R}$	:	Constante universal del gas (8.314 J/mol.K)
$T_t$	:	Temperatura del gas combustible antes de salir por el inyector (k)
$RAC_v$	:	Coefficiente de descarga
$A_g$	:	Área de la garganta del mezclador ( $\text{mm}^2$ )
$R$	:	Proporción de aire primario a la mezcla
$C_L$	:	Suma de pérdidas individuales en las secciones de la garganta y el difusor del mezclador
$RAC_v$	:	Relación aire-gas combustible volumétrica
$r_{ar}$	:	Relación de arrastre
$\eta$	:	Rendimiento Térmico (%)
$E_{agua}$	:	Energía consumida por el agua (kJ)
$E_{gas}$	:	Energía otorgada por el gas (kJ)
$m_{agua}$	:	Masa de agua (kg)
$u_f$	:	Energía interna del agua al final del proceso del calentamiento (kJ/kg)
$u_i$	:	Energía interna del agua al iniciar el proceso del calentamiento (kJ/kg)
$C_{agua}$	:	Calor Específico de agua (kJ/kg·K)
$T_f$	:	Temperatura final del agua (K)
$T_i$	:	Temperatura inicial del agua (K)
$t_a$	:	Tiempo requerido para calentar el agua (min)
$CO_N$	:	Monóxido de carbono neutro (%)
$CO_{2N}$	:	Dióxido de carbono neutro calculado según el gas utilizado (%)



- $\frac{CO_M}{CO_{2M}}$  : Relación de  $CO$  y  $CO_2$  medidos en las muestras obtenidas durante los ensayos de la combustión
- $\Delta V_{cons}$  : Incertidumbre en el volumen del gas combustible consumido ( $m^3$ )
- $\Delta t_a$  : Incertidumbre en el tiempo de duración del ensayo (s)
- $\Delta \dot{Q}_g$  : Incertidumbre del flujo del combustible utilizado ( $m^3/s$ )
- $V_{cons}$  : Volumen del gas combustible consumido ( $m^3$ )
- $\Delta E_{gas}$  : Incertidumbre de la energía que se proporciona por el gas combustible (kJ)
- $\Delta E_{agua}$  : Incertidumbre de la energía que se proporciona al agua (kJ)
- $\Delta m_{agua}$  : Incertidumbre de la medición de masa de agua usada durante el ensayo (kg)
- $\Delta T$  : Incertidumbre de temperatura medida a través de la termocupla (K)
- $\sigma_L$  : Incertidumbre de Lectura correspondiente al rendimiento térmico (%)
- $\sigma_F$  : Incertidumbre debida a fluctuaciones correspondiente al rendimiento térmico (%)
- $\sigma_T$  : Incertidumbre total correspondiente al rendimiento térmico (%)



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tendencia de consumo energético mundial 1980–2030 .....	1
Figura 1.2. Tendencia de consumo energético en Latinoamérica 1980-2030 .....	1
Figura 1.3. Diseño de Quemador radial poroso .....	7
Figura 1.4. Variación del color de la flama .....	11
Figura 1.5. Típico diseño de quemador atmosférico .....	15
Figura 1.6. Fenómeno de arrastre y proceso de mezclado del gas inductor con el gas inducido de la atmósfera .....	15
Figura 1.7. Chorro del fluido inyectado, se forma un cono con un vértice ubicado a aproximadamente 0.6 veces el diámetro del inyector. ....	16
Figura 1.8. Vena Contracta.....	17
Figura 1.9. Sistema Inductor: (a) Mezclador en forma de cilindro , (b) Mezclador en forma de Venturi .....	18
Figura 1.10. Variación de las propiedades del flujo subsónico.....	20
Figura 2.1. Coeficiente de descarga para diferentes geometrías de inyector .....	28
Figura 2.2. Recomendaciones para el largo de los mezcladores .....	32
Figura 2.3. Dimensiones para mezcladores GLP-3 y GN-3.....	33
Figura 2.4. Mezclador propuesto en Análisis numérico del flujo en un mezclador de aire combustible para un quemador atmosférico .....	36
Figura 2.5. Modelo propuesto por C. Lagarza de perfil .....	37
Figura 2.6. Esquema de modelos de mezcladores .....	38
Figura 3.1. Esquema de la cocina y quemador de gas. ....	40
Figura 3.2. Esquema de variación de la distancia “d” entre el inyector y el mezclador .....	40
Figura 3.3. Ejemplos de variación de la distancia “d” entre el inyector y el mezclador: (A) $d=0,5$ cm; (B) $d=0,0$ cm; (C) $d=-0,5$ cm .....	41
Figura 3.4. Estructura diseñada para modificar la distancia “d” entre mezclador e inyector.....	42
Figura 3.5. Esquema de variación de la altura "h" entre el quemador y la olla .....	42
Figura 3.6. Estructura para modificar la distancia “h” entre quemador y olla: a) Vista frontal; b) Vista de perfil.....	43
Figura 3.7. Unión de estructuras: a) Imagen con conducto de gas; b) Inyector y mezclador .....	43
Figura 3.8. Sistema de medición para determinar el rendimiento térmico .....	48
Figura 3.9. Campana utilizada en ensayos .....	49
Figura 3.10. Equipo analizador de gases KM9106 Quintox.....	49

Figura 4.1. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por distancia “d” mezclador-inyector en mezclador GLP-1, para $h=1,0$ cm .....	59
Figura 4.2. La llama en el mezclador GLP-1, para $h=1,0$ cm .....	59
Figura 4.3. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-1, para $d=0,0$ cm.....	60
Figura 4.4. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-2, para $h=1,0$ cm.....	61
Figura 4.5. La llama en el mezclador GLP-2, para $h=1,0$ cm .....	61
Figura 4.6. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en el mezclador GLP-2, para $d=0,5$ cm .....	62
Figura 4.7. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-3, para $h=1,0$ cm.....	63
Figura 4.8. La llama en el mezclador GLP-3, para $h=1,0$ cm .....	63
Figura 4.9. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en el mezclador GLP-3, para $d=0,0$ cm .....	64
Figura 4.10. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-4, para $h=1,0$ cm.....	65
Figura 4.11. La llama en el mezclador GLP-4, para $h=1,0$ cm .....	65
Figura 4.12. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-4, para $d=0,5$ cm.....	66
Figura 4.13. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-5, para $h=1,0$ cm.....	67
Figura 4.14. La llama en el mezclador GLP-5, para $h=1,0$ cm .....	68
Figura 4.15. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-5, para $d=0,0$ cm.....	68
Figura 4.16. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-6 .....	69
Figura 4.17. La llama en el mezclador GLP-6, para $h=1,0$ cm .....	70
Figura 4.18. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-6 .....	70
Figura 4.19. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-1, para $h=1,0$ cm.....	71
Figura 4.20. La llama en el mezclador GN-1, para $h=1,0$ cm .....	72
Figura 4.21. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GN-1, para $d=0,0$ cm.....	72
Figura 4.22. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-2, para $h=1,0$ cm.....	73
Figura 4.23. La llama en el mezclador GN-2, para $h=1,0$ cm .....	74

Figura 4.24. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GN-2, para $d= 0,5$ cm.....	74
Figura 4.25. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-3, para $h= 1,0$ cm.....	75
Figura 4.26. La llama en el mezclador GN-3, para $h= 1$ cm .....	76
Figura 4.27. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GN-3, para $d=0,5$ cm .....	76
Figura 4.28. Rendimiento térmico y emisiones de $(CO)_N$ influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-4, para $h= 1,0$ cm.....	77
Figura 4.29. La llama en el mezclador GN-4, para $h= 1,0$ cm .....	78
Figura 4.30. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $(CO)_N$ debido a altura “h” quemador-olla en mezclador GN-4, para $d=0,5$ cm.....	78
Figura 4.31. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $(CO)_N$ debido a distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-5, para $h= 1,0$ cm.....	79
Figura 4.32. La llama en el mezclador GN-5, para $h=1,0$ cm .....	80
Figura 4.33. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $(CO)_N$ debido a altura “h” quemador-olla en mezclador GN-5, para $d= 0,0$ cm.....	80
Figura 4.34. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $CO_n$ debido a distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-6, para $h= 1,0$ cm .....	81
Figura 4.35. La llama en el mezclador GN-6, para $h= 1,0$ cm .....	82
Figura 4.36. Gráfico de Rendimiento y emisiones de $CO_n$ debido a altura “h” quemador-olla en mezclador GN-6, para $d= 0,0$ cm .....	82
Figura 4.37. Gráfico comparativo de Mediciones de Rendimiento Térmico en mezcladores de GLP, para $h = 1,0$ cm.....	83
Figura 4.38. Gráfico comparativo de Mediciones de Rendimiento Térmico en mezcladores de gas natural, para $h= 1,0$ cm .....	84
Figura 4.39. Gráfico comparativo de Porcentaje de Emisión de $(CO)_N$ en mezcladores de GLP, para $h = 1,0$ cm.....	85
Figura 4.40. Gráfico comparativo de Porcentaje de Emisión de $(CO)_N$ en mezcladores de gas natural, para $h = 1,0$ cm .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Datos de GLP .....	21
Tabla 1.2. Datos del Gas Natural .....	22
Tabla 2.2. Dimensiones de mezclador propuesto por C. Lagarza .....	37
Tabla 2.2. Dimensiones de mezcladores elaborados .....	38
Tabla 3.1. Valores de las variables para los ensayos .....	46
Tabla 3.2. Equipos de medición .....	47
Tabla 3.3. Gases y respectivos valores de $(CO_2)_N$ % .....	50
Tabla 3.4. Incertidumbre de lectura de equipos .....	51



## INTRODUCCIÓN

En el año 2004, la comisión europea elaboró una investigación en la que se plantean las perspectivas de la evolución mundial en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática. En este estudio se sugiere que de mantenerse el sistema actual, la proyección de demanda energética hasta el año 2030 tendrá un crecimiento anual del 1.8%; de forma que el consumo mundial de energía se prevé que aumente en un 70% durante el período 2000-2030. Asimismo, en América Latina la demanda de energía crecería un 2,4% por año en promedio entre 2000 y 2030 (Comisión Europea, 2004).

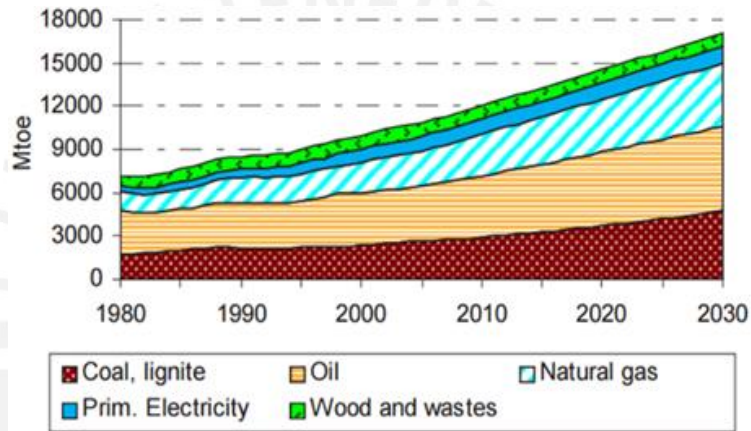


Figura 1.1. Tendencia de consumo energético mundial 1980–2030 (Comisión Europea, 2004)

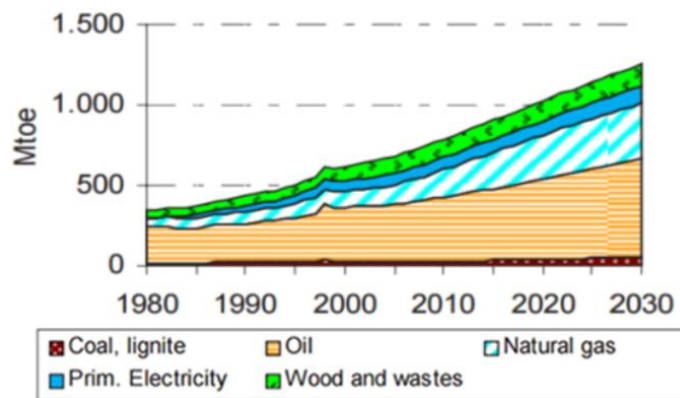


Figura 1.2. Tendencia de consumo energético en Latinoamérica 1980-2030 (Comisión Europea, 2004)

Es así que al mantenerse el predominio de los combustibles fósiles, se produciría mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, incluso superior al consumo de energía (2,1 % anual por

término medio), de modo que en el 2030 las emisiones mundiales serán más del doble que las registradas en el año 1990. Es por ello que los gobiernos de diferentes países están contribuyendo al desarrollo de investigaciones que permitan reducir el gasto de energía, así como darle mayor atención a sus reglamentos del uso de combustibles (Comisión Europea, 2004).

En Perú, el Ministerio de Energía y Minas, en búsqueda de concientizar acerca del buen uso de energía térmica, ha procedido a la elaboración de “Guías de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético”, con las cuales se busca establecer los procedimientos y/o metodologías para orientar, capacitar, evaluar y cuantificar el uso racional de los recursos energéticos, para su aplicación en las distintas áreas de consumo de energía de nuestro país (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2008a).

En el caso del sector residencial, como lo indica una de las ya mencionadas guías, en los hogares peruanos la cocina a gas es el equipo más representativo de consumo de energía térmica. De forma que, según lo descrito por dichas disposiciones, el hogar residencial promedio utiliza un balón y medio de gas doméstico (GLP) al mes, lo que equivale a 741 MJ/mes. Tomando en cuenta que el costo de un balón de gas es de alrededor de 30 Nuevos Soles, el cual entrega aproximadamente 494 MJ/mes, es así que el ingreso del gas natural como fuente de energía permite una alternativa de reemplazo en el sector residencial (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2008a).

Asimismo, el consumo de combustible en las cocinas genera emisiones al ambiente. En el caso del usuario residencial promedio que consume 18 balones de GLP al año, el volumen de emisiones de dióxido de carbono se estima en 523 kilogramos de CO<sub>2</sub> anuales. Es así que, los ahorros en el consumo de combustible influyen directamente a la reducción de su impacto en el medio ambiente (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2008b).

Por ende, en búsqueda de mejorar la eficiencia, se necesitará un adecuado análisis de los factores más influyentes. Es de esta forma que se desarrollará una investigación cuya novedad radica en profundizar en el estudio del diseño energético de un mezclador aire-gas para un quemador de premezcla doméstico, en temas tales como

las condiciones de trabajo y las propiedades de los gases combustibles a utilizar; de forma que se tengan los criterios adecuados para desarrollar las propuestas de diseño.

Por lo tanto, en búsqueda de desarrollar cocinas a gas (GLP y gas natural) que posean una eficiencia térmica elevada, tal que permita su uso incluso en zonas de nuestro país donde la elevada altitud altera la cantidad de oxígeno en el aire, se realizarán varias pruebas con distintos prototipos a diferentes condiciones, para obtener la información necesaria en el desarrollo de la investigación.





## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el diseño energético y evaluar experimentalmente los mezcladores de aire-gas combustible que usan gas natural o gas licuado de petróleo, para un quemador de premezcla doméstico de 1,7 kW.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer las variables requeridas de funcionamiento de la cocina doméstica, para desarrollar el dimensionamiento del mezclador a las condiciones atmosféricas de Lima.
- Calcular los modelos numéricos correspondientes al diseño energético de los mezcladores, basándose en las propuestas elaboradas por otros autores.
- Fabricar los mezcladores según resultados de los modelos numéricos.
- Elaborar los ensayos experimentales utilizando los diferentes mezcladores para conocer el rendimiento térmico y la formación de monóxido de carbono neutro en la cocina de ensayo.

## **METODOLOGÍA**

La presente tesis constará de las siguientes etapas, de modo que se puedan cumplir con los objetivos establecidos en el presente estudio:

- Se procederá con la indagación de información acerca de estudios previos del tema, así como del marco teórico que posibilite desarrollar los cálculos necesarios. Asimismo, se establecerán las condiciones de funcionamiento de la cocina doméstica para el dimensionamiento del mezclador a condiciones atmosféricas que presenta la ciudad de Lima.
- Luego, se desarrollarán los modelos matemáticos que permitan diseñar el mezclador de premezcla.

- Seguidamente, se procederá con la elaboración de los planos de los mezcladores en base a los cálculos numéricos, lo que permitirá la fabricación de estos (Figura 2.6 y Tabla 2.2).

- A continuación, se realizarán los ensayos con los mezcladores fabricados, basándose en lo estipulado por la norma técnica chilena NCh927/1, analizando las razones de las posibles diferencias que se puedan encontrar en los resultados; con el fin de reconocer las condiciones que permitan un mayor aprovechamiento del gas combustible.

En el capítulo 1 se mostrará el marco teórico que presentará aspectos esenciales para el desarrollo de la investigación y, a su vez, facilitará un mejor entendimiento de la misma. Por lo tanto, en este capítulo se detallarán los antecedentes de estudios anteriores, la combustión, los tipos de llama y mezcladores, el proceso de arrastre que se desarrolla en el mezclador y las características de los gases combustibles usados durante los ensayos.

En el capítulo 2 se procederá con los cálculos para obtener las dimensiones de los mezcladores, siguiendo lo recomendado por los diferentes autores. Asimismo, se propondrá el diseño de otros modelos con el fin de evaluar qué efectos puede generar ciertos cambios en la geometría del mezclador.

En el capítulo 3 se describirá el método a seguir para los ensayos de rendimiento térmico y las emisiones de monóxido de carbono neutro, tomando como base lo planteado por la norma técnica chilena NCh927/1, así como las fórmulas planteadas para sus respectivos cálculos.

En el capítulo 4 se mostrará los resultados obtenidos en las pruebas con los distintos mezcladores, con imágenes de las llamas desarrolladas, brindando un breve análisis de lo visto.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Antecedentes

En la actualidad, en lo que respecta a investigaciones que aborden el desarrollo de mezcladores para quemadores a gas en el sector doméstico, se tienen muy pocas que muestren la importancia que este elemento tiene en la combustión. Sin embargo, existen algunos estudios que analizan el impacto que otros aspectos pueden tener en el rendimiento térmico de un quemador a gas. A continuación, se presentan los resultados de algunos trabajos realizados, cuyas con.

Una de las correlaciones encontradas en investigaciones realizadas por Jagruti Surange, Navneet Patil y Akhilesh Rajput fue la existente entre el área del cuello del tubo inyector y el área del quemador, la cual indica, según los resultados de las pruebas desarrolladas, que para obtener un mejor rendimiento el área del primero debe ser un 43% del valor del segundo (Surange, Patil, & Rajput, 2014).

Por otro lado, en otra publicación se evaluó el comportamiento de un quemador de una cocina doméstica con biogás, en el que se determinó su rendimiento térmico usando dos métodos: calentando agua (obteniendo un rendimiento térmico de 21%) y cocinando arroz (alcanzado un rendimiento térmico de 60%), concluyéndose que la distancia del inyector y el mezclador afecta la relación aire/gas, otorgando la posibilidad

de mejorar el rendimiento si se considera esta resolución (Olubiyi, Dauda, Iheanyichukwu, & Olukayode, 2014).

Apinunt Namkhat y Sumrerng Jugjai estudiaron los efectos que puede producir la temperatura del aire primario en la combustión y en la estructura de la flama en quemadores radiales atmosféricos, usando gas licuado de petróleo como combustible. Se determinó que el nivel de aire primario entrante, con o sin precalentamiento, está limitada por el diseño del mezclador y el quemador; mientras que el aire entrante al mezclador decrece al aumentar la temperatura del aire, debido a que el aire en el mezclador presenta mayor viscosidad, generando mayores emisiones debido a una combustión incompleta (Namkhat & Jugjai, 2010).

Con respecto al quemador, se han realizado pruebas con un diseño compuestos de diferentes materiales; una de las más resaltante es la correspondiente a un modelo de quemador denominado quemador radial poroso, constituido en cinco partes: la zona de combustión elaborada por carburo de silicio (SiC); una zona de precalentamiento conformada por esferas de alúmina ( $Al_2O_3$ ); una malla de alambre para sostener la zona de precalentamiento; una carcasa y un mezclador de forma cilíndrica hecho de teflón; con el cual se alcanzó 68% de rendimiento térmico como máximo, utilizando gas licuado de petróleo como combustible (Pantangi, Mishra, Muthukumar, & Reddy, 2011).

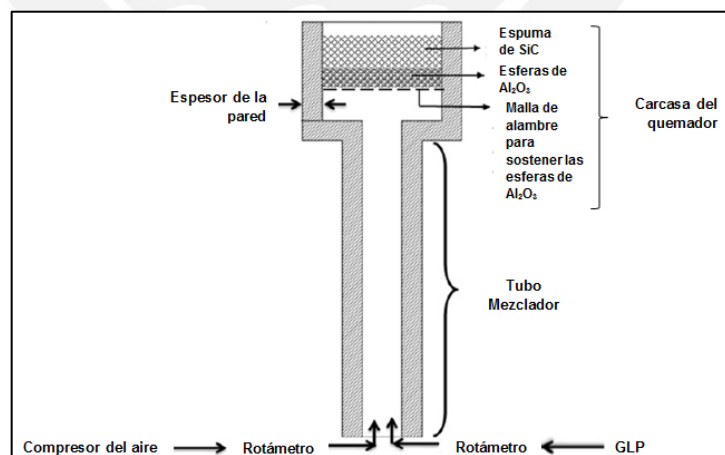


Figura 1.3. Diseño de Quemador radial poroso (Pantangi, Mishra, Muthukumar, & Reddy, 2011)

Por último, en lo que respecta a quemadores domésticos comunes, se tiene registro de algunos estudios experimentales hechos para obtener el rendimiento térmico en sus

respectivos quemadores, siguiendo un proceso similar al que será mostrado en este documento. Es así que según los análisis elaborados con gas natural en el Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA) en Argentina se obtuvieron rendimientos térmicos de 50% para quemadores con potencia de 2,2 kW y de 62% al trabajar con 1,7 kW; mostrando una reducción del rendimiento térmico a medida que se aumenta el valor de la potencia (González, 2010). Mientras que investigadores en India obtuvieron, como máximo, un rendimiento térmico de 66,27% para una potencia de 1,78 kW usando GLP como combustible (Gohil & Channiwala, 2011). Por su parte, en la Universidad de Antioquia en Colombia, se estimaron rendimientos cercanos a 60% para quemadores de GLP de aproximadamente 0,7 kW, y de 39% para los de 1,4 kW (Carranza & Villa, 2012). Finalmente, en el año 2010, el servicio de análisis Energético y ambiental INNOVAPUCP realizó pruebas con prototipos de cocinas a GLP que poseían quemadores de 1,1 kW, obteniendo como resultado un rendimiento de 21,3 % (INNOVAPUCP, 2010).

## **1.2. Introducción a la Combustión**

La combustión es el conjunto de fenómenos físico-químicos que se producen tras la reacción exotérmica de oxidación de sustancias combustibles por elementos comburentes, dando como resultado la formación de llamas, generando así un desprendimiento de calor y luminosidad (Borras, 1987).

Para que una combustión tenga lugar han de coexistir los siguientes tres elementos:

- **Combustible.** Interviene como reductor en las reacciones de oxidación. Pueden ser naturales o artificiales, y pueden existir en cualquiera de estos tres estados: sólido, líquido y gaseoso. En la industria actual se suelen utilizar hidrocarburos ( $C_xH_y$ ) (Asociación Española del Gas (SEDIGAS), 2011).
- **Comburente.** Su presencia permite la combustión del gas, y actúa como oxidante. El comburente más utilizado es el aire, constituido en aproximadamente 20% de oxígeno y 80% de gases inertes (nitrógeno, gases nobles, dióxido de carbono). Siendo el oxígeno puro utilizado en casos excepcionales (Borras, 1987).

- Energía de activación. Corresponde a la energía que debe aportarse a la mezcla conformada por el combustible y el comburente para que se inicie la combustión, de modo que se supere a la temperatura de inflamación (Asociación Española del Gas (SEDIGAS), 2011) y (Borras, 1987).

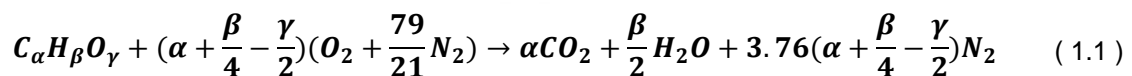
Otras variables que influyen en el proceso de combustión son:

- La composición del combustible;
- La temperatura;
- La presión;
- La presencia de catalizadores (sustancias que aunque no parecen reaccionar, porque no se consumen, controlan el progreso de la reacción).

### 1.3. Combustión Estequiométrica

Es la combustión que se produce con la cantidad mínima de aire para que no se generen inquemados (hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos). No se presenta  $O_2$  en los gases de combustión, ya que este se ha utilizado completamente en la reacción. También se le denomina como combustión teórica, puesto que en la práctica siempre se producen productos inquemados, aunque sean en pequeñas cantidades (Barreras & Pujol, 1966).

La reacción obtenida se representa de forma general como:



### 1.4. Exceso de aire

En la realidad es prácticamente imposible que todo el oxígeno del aire se combine con el combustible para completar la combustión estequiométrica. Por ende, se requerirá un exceso de aire que permita la utilización total de combustible, permitiendo a su vez una menor tasa de emisiones contaminantes (Borras, 1987).

La tasa de aireación o índice de exceso de aire ( $\lambda$ ) es la relación entre el aire real utilizado en la combustión y el aire teórico que se necesitaría en la combustión estequiométrica (Asociación Española del Gas (SEDIGAS), 2011).

Se pueden clasificar las mezclas de la siguiente manera:

- $\lambda = 1$  combustión estequiométrica.
- $\lambda > 1$  combustión con exceso de aire (mezcla pobre)
- $\lambda < 1$  combustión con defecto de aire (mezcla rica)

donde se recomienda que (Borras, 1987):

- Para combustibles sólidos  $\lambda = 1.4$  a  $2.5$  (exceso de aire de 40 a 150 %)
- Para combustibles líquidos  $\lambda = 1.25$  a  $1.6$  (exceso de aire de 25 a 60 %)
- Para combustibles gaseosos  $\lambda = 1.1$  a  $1.4$  (exceso de aire de 10 a 40 %)

Asimismo, el exceso de aire genera una llama con tendencia a ser corta y luminosa. Mientras que en una combustión incompleta, la llama será más larga (Barreras & Pujol, 1966).

### **1.5. La llama**

La llama es la zona en la que tiene lugar la reacción entre el gas combustible y el comburente, acompañada de la descomposición y recombinación de las moléculas, presentando una manifestación visible y calorífica de la reacción de combustión (Martinez, 1992).

Su forma y color permiten reconocer la proporción de combustible. Para mezclas pobres de combustibles de hidrocarburo, el color de la llama suele ser azulado, debido a la radiación de excitación de radicales CH (Martinez, 1992). Por otro lado, cuando la cantidad de aire primario en la mezcla no es la suficiente o si la flama es interrumpida por una superficie fría, terminando la reacción de combustión prematuramente, se generan las llamadas puntas amarillas en la flama (Flores, s.f).

Las puntas amarillas son flecos amarillos que surgen en la parte superior de la llama, provocados por la formación de partículas de carbono, las cuales son formadas por la incorrecta combustión de los hidrocarburos que componen al gas combustible (Asociación Española del Gas (SEDIGAS), 2011).



**Combustión correcta**



**Combustión incorrecta**

Figura 1.4. Variación del color de la flama (Flores, s.f) y (Point & Click Appliance Repair, s.f)

Como consecuencia, se permite la formación de hollín que puede no quemarse totalmente y causar depósitos, afectando tanto el desempeño de los equipos así como su vida útil. Asimismo, se genera mayor cantidad de monóxido de carbono, debido a que no todo es completamente oxidado a  $\text{CO}_2$  (Flores, s.f).

Según la manera de cómo se aporte el combustible al proceso de combustión, se pueden denominar a las llamas como de premezcla o de difusión (Martinez, 1992).

### **1.6. Productos de combustión**

Los productos en la combustión de hidrocarburos están compuestos principalmente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), oxígeno sobrante, gases inertes y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Estos se encuentran a una alta temperatura, por lo que se elevan lejos de la llama, transfiriendo calor al aire (Martinez, 1992).

Si existen paredes próximas a la zona de combustión, al no poder propagarse la llama hasta la pared, aparecerán productos inquemados (Martinez, 1992).



En una combustión defectuosa, puede que parte del combustible no llegue a quemarse, formándose monóxido de carbono (CO), carbono (C), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y hollín; a los que hay que añadir dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), cenizas (según el combustible) y algún otro si se han usado aditivos. Al aumentar la riqueza de la mezcla aumenta la emisión de inquemados, al igual que si la temperatura aumenta la producción de NO y NO<sub>2</sub> lo hará también. Por último, se debe mencionar que no todos los productos de la combustión son gaseosos (cenizas, escorias) (Martinez, 1992).

### **1.7. El Quemador**

Un quemador puede definirse como un dispositivo que permite el desarrollo de la combustión, de manera controlada y regulable, manteniendo la mezcla aire-gas en proporciones convenientes, buscando desarrollar la potencia calorífica esperada, y transferir el calor producido a la carga deseada (Márquez, 2005).

En cuanto a su clasificación, la Comisión de Utilización de la I.G.U. (International Gas Union) ha establecido una numeración para sus diferentes variables, independiente de que un tipo de quemador pueda recibir una denominación diferente por su constructor.

En esta clasificación, cada quemador queda designado por un grupo de 6 cifras, de las que cada cifra puede tener diversas variantes (Borras, 1987):

- 1º Cifra: Modo de formación de la mezcla aire-gas (7 variantes).
- 2º Cifra: Categorías de presión de alimentación en aire y en gas (7 variantes).
- 3º Cifra: Vía de salida de aire-gas en los orificios (6 variantes).
- 4º Cifra: Manera de estabilizar la llama (4 variantes).
- 5º Cifra: Localización de la combustión (7 variantes).
- 6º Cifra: Precalentamiento o no del aire de combustión (3 variantes).

Esta tesis se enfocará sólo en los mezcladores para un quemador de combustibles gaseosos, específicamente de gas natural o gas licuado de petróleo. De manera que, basándose en la categorización señalada, el quemador a usar quedará designado con el código 611042, debido a que:

- 1º Cifra: El número 6 representa que la formación de la mezcla aire-gas será de forma parcial antes del quemador.
- 2º Cifra: El número 1 representa que ambos gases (gas licuado de petróleo y gas natural) trabajarán a presión baja (menor a 50 mmH<sub>2</sub>O), mientras que el aire a presión atmosférica.
- 3º Cifra: El número 1 indica que la salida de la mezcla a través del quemador será por orificios simples.
- 4º Cifra: El número 0 denota que la estabilización de la llama se dará sin ningún artificio.
- 5º Cifra: El número 4 indica que la combustión se dará sobre una superficie refractaria.
- 6º Cifra: El número 2 expresa que el quemador podría funcionar con precalentamiento de aire; sin embargo, esto no se desarrollará en el presente estudio, ya que se busca emular las condiciones de una cocina doméstica estándar.

#### **1.7.1. Quemadores de mezcla previa**

Para realizar el proceso de combustión completa, el aire necesario se mezcla con el gas a la entrada del quemador, o justo antes de iniciarse la combustión. La mezcla previa efectuada entre el gas combustible y el aire puede ser parcial, utilizando solo una parte del aire requerido, denominada como aire primario (Borras, 1987).

En estos quemadores, el mezclador tiene por objeto suministrar al quemador una mezcla de aire y gas combustible, para lo cual se fijan la proporción aire/gas, el caudal y la presión de gas. Los sistemas de mezcla previa puede ser (Borras, 1987):

- Máquina de mezcla o grupo de mezcla: Consta de un recipiente que posee una presión inferior a la atmosférica, el cual es alimentado a través de dos agujeros calibrados, uno para aire atmosférico y el otro con gas regulado a presión atmosférica. Se utiliza principalmente para quemadores que exigen una mezcla total a una presión determinada.

- Cámara de mezcla: Alimentada mediante aire y gas a presión por canales provistas de válvulas de regulación progresivas y de mando simultáneo.
  
- Mezclador de inducción: En este método, el gas inductor es desembocado al ambiente mediante un inyector, arrastrando al gas inducido hacia el mezclador. De este se desprenden los siguientes casos:
  - Mezcladores de inducción atmosférica;
  - Mezcladores de aire inductor y gas despresurizado: el aire comprimido aspira al gas, que es parcialmente despresurizado o reducido a presión atmosférica;
  - Mezcladores donde el aire y el gas están a presión.

Siendo los quemadores de mezcla previa por inducción atmosférica los más usados, se los analizará con mayor detalle.

#### **1.7.1.1. Quemadores de mezcla previa por inducción atmosférica**

El gas combustible es el fluido inductor; mientras que el aire se induce del ambiente. El principio de funcionamiento es la inducción y el efecto Venturi (Universidad de Valladolid, 2011).

Suelen poseer una modulación de potencia, mediante una válvula para el flujo del gas combustible. Además, funcionan con premezclado parcial, de modo que las tasas de aireación son menores a uno (Borras, 1987).

En la Figura 1.5 se muestra una imagen esquematizada del diseño básico de un quemador de premezcla. El gas emerge del inyector hacia la cámara de mezcla, donde se combina con el aire primario. Esta cámara puede poseer una figura en forma de un venturi cónico o un tubo con lados paralelos, y debe garantizar, como su nombre lo indica, la mezcla de aire y gas, así como permitir que esta sea direccionada hacia el puerto del quemador (Jones, 1989).

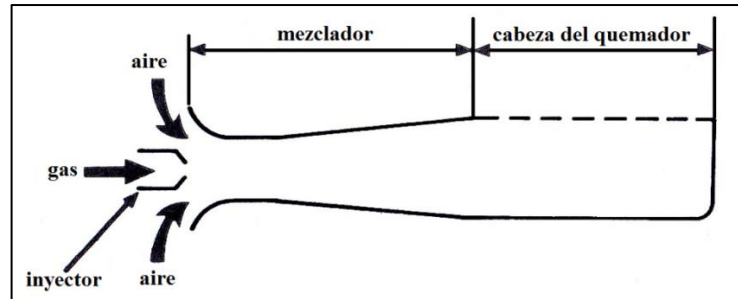


Figura 1.5. Típico diseño de quemador atmosférico (Jones, 1989)

Las ventajas principales son su simplicidad y bajo costo, empleándose cuando se posee presiones de mezcla cercanas a la presión atmosférica. Su inconveniente es la sensibilidad en el arrastre de aire que se pueden producir por las variaciones de presión en la cámara o del recinto donde se coloca el quemador (Jones, 1989).

### 1.8. Arrastre del fluido inductor

Este efecto tiene lugar cuando un fluido emerge de la boquilla de un inyector, arrastrando al fluido circundante hacia la misma dirección. Esto se produce por la zona de baja presión que se genera a la salida del inyector, cuando el fluido es expulsado, lo que hace que el gas circundante sea arrastrado hacia el fluido inductor y, sumado a la turbulencia presente, las sustancias se mezclan. Una muestra de esto se puede ver en la Figura 1.6 (Baukal, 2003).

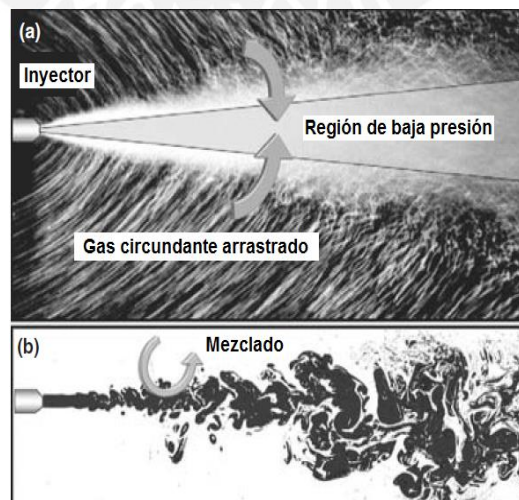


Figura 1.6. Fenómeno de arrastre y proceso de mezclado del gas inductor con el gas inducido de la atmósfera (Baukal, 2003).

El chorro coge una forma cónica al salir del inyector, incrementando su diámetro y flujo másico con la incorporación del fluido inducido, pero perdiendo velocidad a medida que la distancia aumenta (Márquez, 2005).

En la Figura 1.7, se pueden reconocer tres zonas: en la primera se puede observar un núcleo del gas descargado, el cual se va diluyendo a lo largo del chorro, y se extiende hasta aproximadamente 4 ó 5 veces el diámetro de inyector. La segunda zona se puede definir como una de transición, que se extiende hasta una longitud de 8 veces el diámetro del inyector. Por último, la tercera zona, se le denomina como la zona de semejanza, y puede prolongarse hasta 100 veces el diámetro (Márquez, 2005).

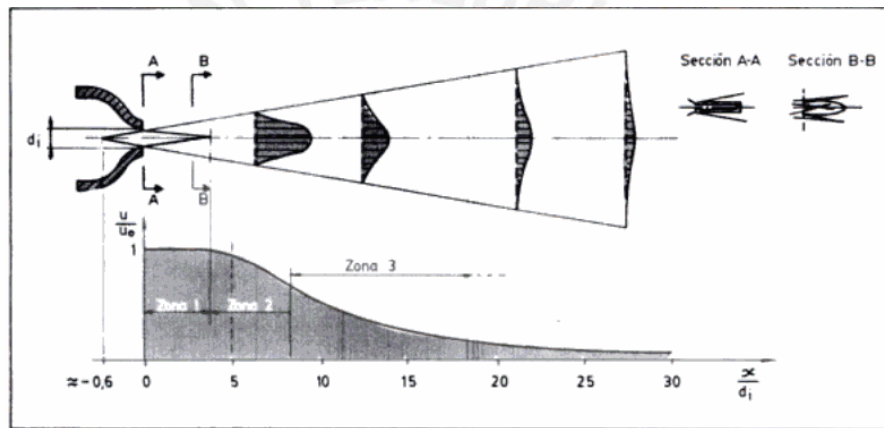


Figura 1.7. Chorro del fluido inyectado, se forma un cono con un vértice ubicado a aproximadamente 0.6 veces el diámetro del inyector (Márquez, 2005).

El control de la mezcla entre el gas inducido y el aire en la atmósfera depende del diseño del inyector del gas combustible (el cual, en la presente tesis, será gas natural o gas licuado de petróleo). Por ejemplo, en dos inyectores de diámetros distintos, por los cuales pasan el mismo flujo másico, el más pequeño operará a una mayor presión, permitiendo una mejor mezcla con el gas circundante (aire) (Márquez, 2005).

### 1.9. Sistema de Inducción

Este sistema consta de dos elementos principales:

- Inyector. Es la pieza que permite convertir la energía potencial asociada a la alta presión del suministro de gas en la energía cinética del gas expulsado. El tamaño y la forma del orificio de salida pueden variar el caudal del gas y, por lo tanto, la energía que puede ser brindada por esta (Jones, 1989).

El área del agujero no es necesariamente el mismo que el del flujo del gas a través del orificio. Este cambio en el área del flujo es provocado por la denominada "vena contracta", como se ve en la imagen 1.8, la cual es un estrechamiento del flujo a un área más pequeña que la del propio agujero (Fulford, 1996).

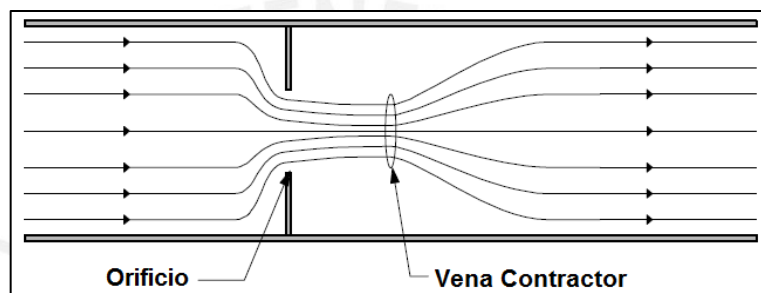


Figura 1.8. Vena Contracta (Fulford, 1996).

Es por ello para su dimensionamiento se utiliza un factor conocido como "coeficiente de descarga", el cual toma en cuenta los efectos producidos por la "vena contracta" y las pérdidas por fricción a través del orificio. Por lo general, tiene un valor entre 0,85 y 0,95 (Fulford, 1996).

- Mezclador. Tal como su nombre lo indica, su función es la de propiciar una correcta combinación del gas combustible con el aire, por lo que es de importancia reconocer qué aspectos influyen en su correcto diseño. Está dividido en tres secciones (Baukal, 2003):
  - ◆ Entrada: Posee una forma cónica convergente para reducir las pérdidas de presión del aire inducido al entrar al sistema inductor, permitiendo así una mejora del proceso de inducción.
  - ◆ Garganta: El diseño que se otorgue al diámetro de esta sección influirá en el rendimiento del arrastre al sistema inductor, dependiendo del impulso del gas

inductor. La relación entre la longitud total del mezclador y el diámetro de la garganta del mezclador ( $L_m/d_g$ ) es un factor a considerar en el diseño; ya que si en caso el valor es muy alto, el impulso otorgado por el gas combustible será consumido por la fricción a lo largo de las paredes del mezclador, mientras que de ser muy baja, el gas no tendrá contacto con las paredes del cuello, lo que conllevaría una menor calidad de la mezcla.

- ◆ Difusor: Presenta una forma cónica, usualmente con un ángulo dentro del rango de  $5^\circ$  y  $10^\circ$ ; este bajo valor le permite reducir las pérdidas y mejorar el proceso de mezclado.

En la Figura 1.9 se puede ver al gas inductor expulsado hacia dos modelos de mezcladores diferentes, en los cuales se generan una zona de baja presión, empujando al aire circundante hacia el mismo camino.

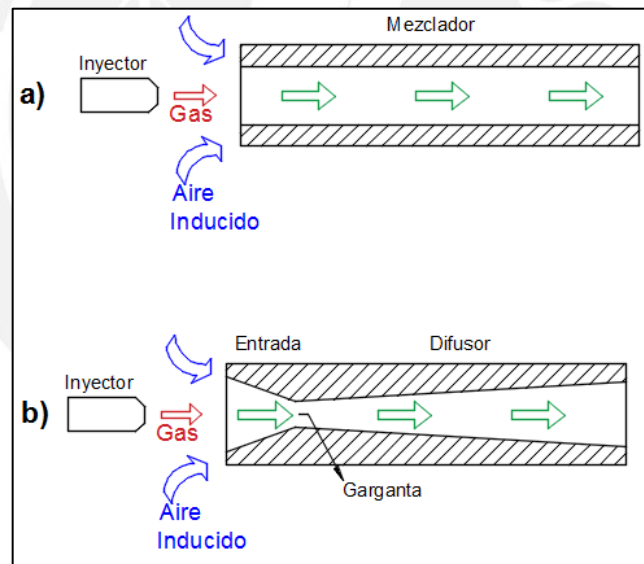


Figura 1.9. Sistema Inductor: (a) Mezclador en forma de cilindro , (b) Mezclador en forma de Venturi

### 1.10. Flujo sónico y subsónico (Cengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2006)

La velocidad del sonido “c” es la velocidad a la cual una onda de presión infinitesimalmente pequeña viaja a través de un medio, la cual puede ser originada por un pequeño disturbio.

Por otra parte, un segundo parámetro importante en el análisis del fluido es el número de Mach “Ma”. Este resulta de la división entre la velocidad real del fluido “V” y la velocidad del sonido en el mismo “c”, en el mismo punto:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1.4)$$

El régimen de flujos se puede describir en términos del número de Mach. El flujo se llama sónico cuando  $Ma = 1$ , subsónico cuando  $Ma < 1$ , supersónico cuando  $Ma > 1$ .

Las propiedades del fluido en una región donde el número de Mach es unitario (flujo a velocidad del sonido) son llamadas propiedades críticas.

Para quemadores domésticos, así como en los industriales, se utilizan, en mayor medida, inyectores convergentes. Estos pueden ofrecer, como máximo, condiciones sónicas para el gas expulsado. La razón de esto se puede explicar a través de la siguiente relación:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} \times (1 - Ma^2) \quad (1.5)$$

Considerando que el área del flujo “A”, así como la velocidad “V”, son positivos. Si se tratase de un flujo supersónico ( $Ma^2 > 1$ ), si se reduce el área ( $dA < 0$ ), la velocidad del flujo también decrecerá ( $dV < 0$ ). Mientras que en un flujo subsónico ( $Ma^2 < 1$ ), al disminuirse el área ( $dA < 0$ ) se incrementaría la velocidad ( $dV > 0$ ).

Por lo tanto, para acelerar un fluido debe usarse una sección con forma convergente a velocidades subsónicas, y uno divergente para velocidades supersónicas. De modo que no es posible obtener un flujo supersónico mediante la reducción del área del tramo por donde el gas a condiciones subsónicas es expulsado; pues en el supuesto de que se consiguiese dicha característica en el tramo final, esta disminuiría por las razones ya explicadas, haciendo el flujo subsónico nuevamente.

En la Figura 1.10 se puede apreciar un resumen de lo explicado anteriormente



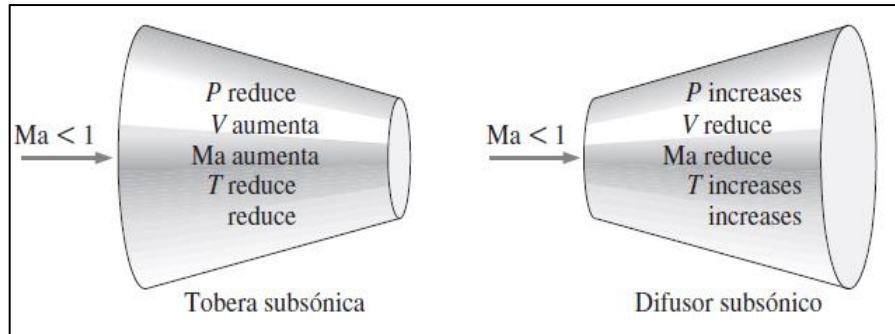


Figura 1.10. Variación de las propiedades del flujo subsónico (Cengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2006)

En conclusión, debido a la forma convergente en la entrada del mezclador, la velocidad del flujo podrá ser como máximo sónica, nunca se podrá alcanzar velocidades supersónicas. Además, la presión del fluido se reducirá a lo largo del tramo, alcanzando su valor más bajo al entrar a la sección divergente del mezclador. Por lo tanto, solo se podría llegar a condiciones críticas ( $Ma = 1$ ) en la región de menor área, la garganta del mezclador.

### 1.11. Gases Combustibles

Tanto el gas natural como el gas licuado de petróleo (GLP) son combustibles fósiles que se derivan de depósitos geológicos originados por la descomposición de plantas y animales, los cuales fueron sometidos al calor y a la presión de la corteza terrestre durante millones de años. Sin embargo, ambos poseen diferencias en cuanto a su composición, obtención, procesos de producción, transporte y en la comercialización (OSINERMING, 2014).

#### 1.11.1. Gas licuado de petróleo (GLP)

El gas licuado de petróleo (GLP) es un hidrocarburo que se obtiene del proceso de refinamiento del petróleo, como subproducto de los procesos de transformación física (e.g. destilación atmosférica), y de transformación química (e.g. craqueo católico); así como también mediante la reducción de temperatura del gas natural hasta la

condensación del propano y el butano. Está compuesto principalmente de propano y butano (OSINERMING, 2014).

Durante los ensayos, se utilizó GLP con una proporción de 60% de propano y 40% de butano (OSINERMING, 2014), trabajando a una presión de 28 mbar, pues este suele ser la presión de operación en las instalaciones a nivel residencial.

Los valores a considerar para los cálculos se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Datos de GLP (Rojas, 2016)

Variable	Unidad	Valor
Presión manométrica del flujo ( $P_g$ )	mbar	28
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kJ/kg	46 090
Densidad ( $\rho_g$ )	kg/m <sup>3</sup>	2,1023
Relación de calores específicos (k)	-	1,135
Peso Molecular (MW)	kg/kmol	48,305 x 10 <sup>-3</sup>
Densidad Relativa (s)	-	1,7161

### 1.11.2. Gas Natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos que se ubican en los yacimientos fósiles, pueden encontrarse en forma “asociada”, cuando el yacimiento está acompañado de petróleo o carbón, o “no asociada”, estando junto a pequeñas cantidades de otros hidrocarburos o gases. Además, su composición es de principalmente metano, alrededor de un 90%, en conjunto con otros gases como nitrógeno, etano, dióxido de carbono, butano, propano, ácido sulfúrico, entre otros. No obstante, la composición del gas no es uniforme, pudiendo variar según el yacimiento (OSINERMING, 2014).

En nuestro país, la presión de operación para artefactos a gas natural para uso residencial debe tener una presión mínima de 16 mbar y máxima de 23 mbar (INDECOPI, 2006). Es así que se trabajará a la condición mínima de trabajo, una presión de 16 mbar. En la Tabla 1.2 se muestran los datos considerados para este gas.

Tabla 1.2. Datos del Gas Natural (Rojas, 2016)

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Presión manométrica del flujo ( $P_g$ )	mbar	16
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kJ/kg	48427,84
Densidad ( $\rho_g$ )	kg/m <sup>3</sup>	0,72
Relación de calores específicos (k)	-	1,27
Peso Molecular (MW)	Kg/kmol	$17,7 \times 10^{-3}$
Densidad Relativa (s)	-	0,5878



## CAPÍTULO 2

### DISEÑO DE MEZCLADORES DE PRE-MEZCLA

En este capítulo se procederá con los diseños de los mezcladores para un quemador de pre-mezcla doméstico de 1,7 kW, potencia que fue seleccionada a partir de ensayos previos, en los cuales se comprobó que manteniendo este valor se puede trabajar dentro de los límites de presión con ambos gases combustibles (GN y GLP) mencionados en el capítulo anterior.

Sin embargo, antes se debe establecer el área de salida del inyector, ya que si se utiliza uno más grande de lo requerido, el gas combustible no podrá mezclarse apropiadamente con el aire, generando una mala combustión; por otro lado, de ser más pequeño, el quemador no podrá producir la energía requerida (Baukal, 2003).

#### 2.1. Elección del Inyector

El primer paso es determinar el flujo de gas que debe ser descargado a través del orificio para que el quemador opere a las condiciones requeridas, teniendo en cuenta que la potencia requerida ( $P_{req}$ ) es de 1.7 kW. Asimismo, deben considerarse los valores numéricos correspondientes a las características de los combustibles a utilizar, mostrados en las Tablas 1.1 y 1.2.

Siendo el flujo másico determinado mediante la siguiente relación:

$$\dot{m}_g = \frac{P_{req}}{PCI} \quad (2.1)$$

en donde:

$\dot{m}_g$  = Flujo másico del gas combustible (kg/s)

$P_{req}$  = Potencia requerida en el quemador (kW)

PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

Es así que el caudal requerido del gas puede estimarse de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \times 60 \times 10^3 \quad (2.2)$$

en donde:

$\dot{Q}_g$  = Caudal de gas combustible (l/min)

$\dot{m}_g$  = Flujo másico del gas combustible (kg/s)

$\rho_g$  = Densidad del gas combustible (kg/m<sup>3</sup>)

Obteniendo lo siguiente:

- Para gas licuado de petróleo:  $\dot{m}_g = 3,685 \times 10^{-5}$  kg/s y  $\dot{Q}_g = 1,08$  l/min
- Para gas natural:  $\dot{m}_g = 3,51 \times 10^{-5}$  kg/s y  $\dot{Q}_g = 2,93$  l/min

Posteriormente, con el objetivo estimar la naturaleza del flujo del gas, se procede a determinar el ratio de la presión crítica. De modo que en caso este sea mayor al cociente de la presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) entre la presión absoluta del gas ( $P_A$ ), se concluirá que la salida del flujo es sónico; caso contrario, será subsónico (Baukal, 2003). Este valor es definido como:

$$P_c = \left[ \frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.3)$$

en donde:

$P_c$  = Presión crítica correspondiente al gas combustible a emplear

$k$  = Relación de calores específicos del gas

Tras el cálculo, se tiene lo siguiente:

- Para gas licuado de petróleo:  $P_c = 0,577$
- Para gas natural:  $P_c = 0,545$

La relación de presiones “ $R_p$ ” a ser comparada con “ $P_c$ ” es la siguiente:

$$R_p = \frac{P_{atm}}{P_A} \quad (2.4)$$

en donde:

$P_{atm}$  = Presión atmosférica (mbar)

$P_A$  = Presión absoluta del gas (mbar)

Siendo la presión atmosférica  $P_{atm}$  (Baukal, 2003):

$$P_{atm} = 101325 \cdot \left[ \frac{(T_{amb} - (6.5 \times 10^{-3}) \cdot z)}{T_{amb}} \right]^{5.259} \quad (2.5)$$

en donde:

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente (K)

$z$  = Altura sobre el nivel del mar (m)

Teniendo en cuenta que el lugar donde se realizan los ensayos será uno de los ambientes de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la cual se ubica a aproximadamente 100 m.s.n.m, y la temperatura promedio del ambiente donde se realizan las pruebas es de 25°C (298,15 K), se determina que:

$$P_{atm} = 1,002 \times 10^3 \text{ mbar}$$

mientras que la presión absoluta  $P_A$  del gas:

$$P_A = P_g + P_{atm} \quad (2.6)$$

en donde:

$P_g$  = Presión manométrica del gas correspondiente, ya sea gas licuado de petróleo o gas natural.

resultando:

- Para gas licuado de petróleo:  $P_A = 1,032$  bar
- Para gas natural:  $P_A = 1,018$  bar

Posteriormente, retornando a la ecuación 2.4, se calcula lo siguiente:

- Para gas licuado de petróleo:  $R_p = 0,971$
- Para gas natural:  $R_p = 0,984$

De esta forma, luego de comparar los valores de " $P_c$ " y " $R_p$ " obtenidos para ambos gases, se concluye que, ya sea al utilizar gas natural como GLP, el flujo presentará un carácter subsónico.

Por lo tanto, el área de salida del orificio " $A_e$ " estará dada de la siguiente forma:

$$A_e = \frac{m_g}{M_e C_e \rho_e C_d} \quad (2.7)$$

El número de Match " $M_e$ " a la salida del inyector se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$M_e = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{P_A}{P_{atm}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (2.8)$$

resultando:

- Para gas licuado de petróleo:  $M_e = 0,228$
- Para gas natural:  $M_e = 0,156$

La velocidad del sonido “ $C_e$ ” en el gas combustible a la salida del inyector se estima con la siguiente relación:

$$C_e = \left[ \frac{kT_e \bar{R}}{MW} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

en donde:

$T_e$  = Temperatura del gas combustible a la salida del inyector (K)

$\bar{R}$  = Constante universal del gas (8,314 J/mol.K)

MW = Peso molecular del gas

La cual, a su vez, estará influenciada por la temperatura del combustible “ $T_e$ ” cuando es expulsado a través del inyector, como se puede ver en la siguiente relación:

$$T_e = \frac{T_t}{1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) M_e^2} \quad (2.10)$$

siendo “ $T_t$ ” la temperatura total del gas combustible medido antes de salir por el inyector, el cual suele tener un valor de 24°C (297,15 K), según lo medido mediante el caudalímetro digital utilizado.

resultando:

- Para gas licuado de petróleo:  $T_e = 292,123$  K y  $C_e = 238,89$  m/s
- Para gas natural:  $T_e = 292,064$  K y  $C_e = 423,29$  m/s

Mientras que la densidad del gas inductor “ $\rho_e$ ” a la salida del inyector es la siguiente:

$$\rho_e = \frac{P_{atm}}{\left( \frac{T_e \bar{R}}{MW} \right)} \quad (2.11)$$

resultando:



- Para gas licuado de petróleo:  $\rho_e = 2,045 \text{ kg/m}^3$
- Para gas natural:  $\rho_e = 0,739 \text{ kg/m}^3$

Y, finalmente, el coeficiente de descarga “ $C_d$ ”, cuyo valor dependerá sólo de la forma interna que el inyector posea, tal como se observa en la Figura 2.1, donde se observa diversas opciones de diseño que se le puede dar al inyector a modo de ejemplo.





Geometría interna del Inyector				
$\frac{\text{Longitud de orificio}}{\text{Diámetro}}$	0.58	3.5	0.8	1.0
Ángulo de salida del inyector	45°	55°	33°	40°
Coficiente de descarga	0.81	0.84	0.93	0.94

Figura 2.1. Coeficiente de descarga para diferentes geometrías de inyector (Jones, 1989)

Para el presente estudio, se debe considerar que el modelo del inyector a escoger para los ensayos será uno que pueda encontrarse en el actual mercado peruano. De modo que no puede asegurarse el valor del coeficiente de descarga que le corresponde, pues se desconoce la geometría interna del elemento. Por lo tanto, inicialmente se asumirá que el coeficiente de descarga “ $C_d$ ” es 1, considerando así que el flujo de salida a través del inyector se dará en su totalidad. Posteriormente, se estimará un valor cercano del coeficiente a través de los ensayos correspondientes.

De esta manera, mediante la ecuación 2.7 se obtiene que:

- Para gas licuado de petróleo:  $A_e = 0,331 \text{ mm}^2$
- Para gas natural:  $A_e = 0,720 \text{ mm}^2$

Ya que el área de salida del inyector ( $A_e$ ) posee forma circular, se puede determinar el diámetro mediante la siguiente relación:

$$A_e = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (2.12)$$

Por lo tanto, para los ensayos realizados con GLP, el diámetro del inyector a usar debería ser de 0,649 mm; mientras que para el gas natural uno de 0,957 mm. Sin embargo, debido a la dificultad de producir inyectores con esas dimensiones, se usarán los siguientes:

- Para gas licuado de petróleo, se usará un inyector con diámetro de 0.7 mm.
- Para gas natural, se usará un inyector con diámetro de 1 mm.

Posteriormente, se estimará el verdadero valor del coeficiente de descarga “ $C_d$ ” usando una versión empírica del teorema de Bernoulli (Fulford, 1996):

$$Q = 0.0467 \cdot C_d \cdot A_e \cdot \sqrt{\frac{P_g}{s}} \quad (2.13)$$

en donde:

$Q$  = Caudal del gas ( $m^3/h$ ) (Ver resultados de la ecuación 2.2)

$C_d$  = Constante de descarga del inyector

$A_e$  = Área de salida del orificio ( $mm^2$ )

$P_g$  = Presión del gas (mbar)

$s$  = Densidad Relativa del gas

Es así que se obtiene que los valores reales de coeficientes de descarga de los inyectores a utilizar sean de 0,88 para GLP y 0.92 para gas natural.

Finalmente, tras realizar nuevamente el cálculo de los diámetros de los inyectores con los valores reales de los coeficientes de descarga “ $C_d$ ”, se obtienen los siguientes resultados:

- Para gas licuado de petróleo, se usará un inyector con diámetro de 0.705 mm.
- Para gas natural, se usará un inyector con diámetro de 0.999 mm.

De manera que la elección del inyector a utilizar no se debe de cambiar, pues los resultados no han sido alterados con notoriedad, manteniéndose lo siguiente

- Para gas licuado de petróleo, se requerirá un inyector con diámetro de 0.7 mm.
- Para gas natural, se requerirá un inyector con diámetro de 1 mm.

## 2.2. Diseño del Mezclador

A continuación, se desarrollan los cálculos correspondientes al diseño de los mezcladores, basándose en lo propuesto por diferentes autores. Además, se plantea el diseño de otros modelos de mezcladores que difirieren de las características recomendadas, con el fin de comprobar el efecto que puede generar ciertos cambios en los resultados.

### 2.2.1. Propuesta H.Jones

Para el dimensionamiento se debe asumir lo siguiente (Jones, 1989):

- El aire es arrastrado perpendicular al eje del mezclador, y por lo tanto no genera impulso axial.
- El flujo de la mezcla aire-gas es incompresible, tal que la densidad no depende de la presión. Esta es una buena aproximación para los niveles de presión utilizados en los quemadores domésticos; a su vez, el efecto de la temperatura también es ignorado.
- La distribución de la presión en la cabeza del quemador es uniforme.
- La cámara de la combustión está a presión atmosférica.

Siendo la relación del área de salida del inyector ( $A_e$ ) y el área de la garganta del mezclador ( $A_g$ ) la siguiente (Jones, 1989):

$$\frac{A_e}{A_g} = \frac{s}{(s + 1)(1 + R)(1 + C_L)} \quad (2.14)$$

en donde:

$s$  = Densidad relativa del gas combustible.

$R$  = Proporción de aire primario a la mezcla.

$C_L$  = Suma de pérdidas individuales en las secciones de la garganta y el difusor del mezclador.

Para los quemadores de mezcla previa parcial para uso doméstico, se suele diseñar el mezclador de forma que le permita operar bajo un nivel de 40% a 60% de aire primario, de manera que “R” puede tomar un valor dentro de un rango de 4 a 6. Para este caso, se ha decidido, según lo recomendado por el autor, trabajar con un porcentaje de 60% tanto para gas natural como GLP, otorgándole a “R” el valor de 6.

Para el caso de “ $C_L$ ”, este depende del largo del mezclador, del diámetro de la garganta y del ángulo de la sección del difusor. Es así que el promedio para el coeficiente de pérdidas en la garganta es de 0,1 a 0,2; mientras que en el difusor se conoce que el mezclado más óptimo se obtiene cuando el ángulo de esta sección está dentro de un rango de  $5^\circ$  a  $10^\circ$ , siendo el mejor en  $7^\circ$ , agregándole al coeficiente de pérdidas un valor de 0,15. De forma que, siguiendo lo ya descrito, las pérdidas sumadas están en un rango de 0,25 a 0,35. Para el presente caso, se ha optado por considerar el mayor valor para el coeficiente  $C_L$ , el cual es de 0,35.

De esta manera, se obtiene que:

- Para gas licuado de petróleo:  $A_g = 16,72 \text{ mm}^2$
- Para gas natural:  $A_g = 83,18 \text{ mm}^2$

Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones dadas por H.Jones, el mezclador que trabaja con GLP debe contar con un diámetro de garganta de 4,6 mm; mientras que para gas natural el diámetro de la garganta debe ser de 10,3 mm.

Es cuanto a las demás dimensiones, el diseño se basará en los dos modelos de mezcladores mostrados en la Figura 2.2, donde se indica que el largo de las secciones está ligado al diámetro de la garganta ya calculado. Además, como se describió anteriormente, se considera un ángulo de  $7^\circ$  para la sección divergente; mientras que para la entrada uno de  $40^\circ$ , debido a que esta medida se suele utilizar en los mezcladores instalados en las cocinas comerciales.

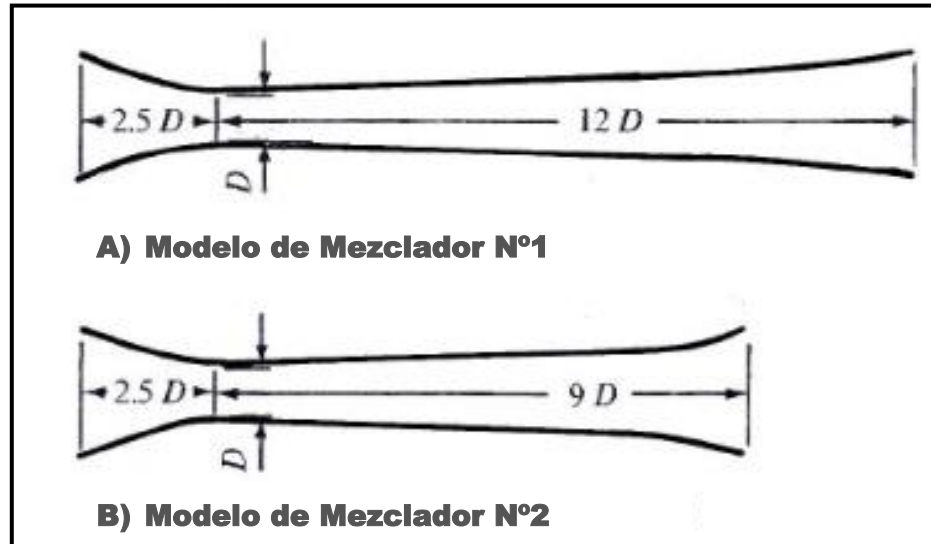


Figura 2.2. Recomendaciones para el largo de los mezcladores (Jones, 1989)

Es así que se desarrollarán dos modelos de mezcladores para cada gas combustible a emplear, correspondientes a la recomendación dada por el autor en la Figura 2.2:

Para gas licuado de petróleo (GLP):

- El modelo GLP-1, con un diámetro de garganta de 4,6 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 11,5 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 55,2 mm.
- El modelo GLP-2, con un diámetro de garganta de 4,6 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 11,5 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 41,4 mm.

Para gas natural:

- El modelo GN-1, se diseñará con un diámetro de garganta de 10,3 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 25,75 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 123,6 mm.
- El modelo GN-2, se diseñará con un diámetro de garganta de 10,3 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 25,75 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 92,7 mm.

Por otra parte, con el propósito de analizar la influencia que tiene la geometría de la sección de entrada del mezclador en la calidad de la combustión, se desarrollará un tercer mezclador, para cada gas combustible, basándose en el esquema mostrado en la Figura 2.3, el cual posee el doble de longitud de entrada que los anteriores dos modelos de la Figura 2.2; pero manteniendo los demás aspectos, tales como el largo del difusor, los ángulos de las secciones de entrada y salida, y el diámetro de la garganta. El análisis se dará mediante la comparación de los resultados de los respectivos ensayos con los mezcladores.

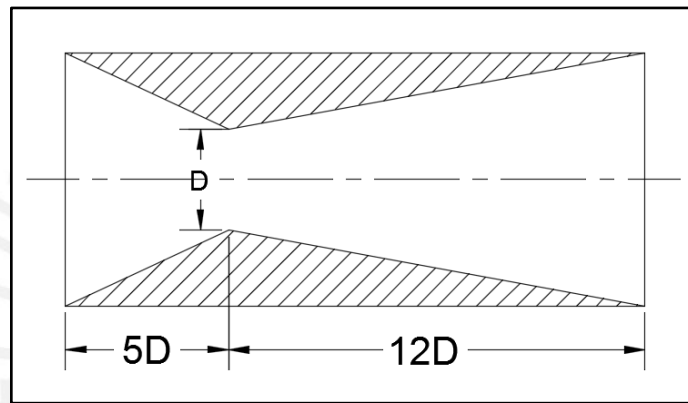


Figura 2.3. Dimensiones para mezcladores GLP-3 y GN-3

De esta manera se obtiene lo siguiente:

Para gas licuado de petróleo (GLP):

- El modelo GLP-3, con un diámetro de garganta de 4,6 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 23 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 55,2 mm.

Para gas natural:

- El modelo GN-3, se diseñará con un diámetro de garganta de 10,3 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 51,5 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 123,6 mm.

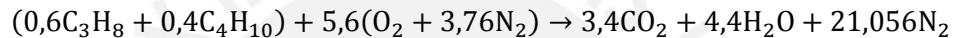
### 2.2.2. Propuesta D.Fulford

En esta propuesta, para el dimensionamiento del mezclador se seguirá el siguiente procedimiento (Fulford, 1996):

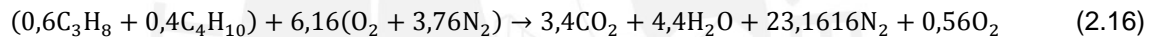
Se inicia con el análisis de la mezcla estequiométrica de ambos combustibles:

Para gas licuado de petróleo (GLP):

El GLP utilizado está constituido en 60% por propano y 40% de butano (OSINERMING, 2014), de modo que se tiene lo siguiente:



Haciendo uso de un exceso de aire de 10% se obtiene:

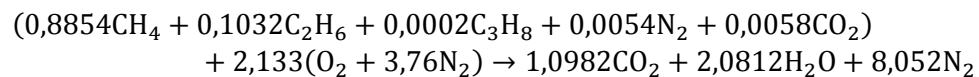
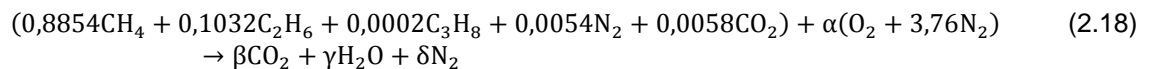


Es así que la relación de aire-gas combustible será la siguiente:

$$RAC_v = \frac{6,16 \times 4,76 \times 24,8}{1 \times 24,8} = 29,322 \quad (2.17)$$

Para gas natural:

El gas natural está constituido por 88,54% de metano, 10,32% de etano, 0,02% de propano, 0,54% de nitrógeno y 0,58% de dióxido de carbono (Rojas, 2016). De modo que se tiene lo siguiente:



Haciendo uso de un exceso de aire de 10% se obtiene:

$$(0,8854CH_4 + 0,1032C_2H_6 + 0,0002C_3H_8 + 0,0054N_2 + 0,0058CO_2) + 2,346(O_2 + 3,76N_2) \quad (2.19)$$

$$\rightarrow 1,0982CO_2 + 2,0812H_2O + 8,826N_2 + 1,2478O_2$$

Es así que la relación de aire-gas combustible será la siguiente:

$$RAC_v = \frac{2,346 \times 4,76 \times 24,8}{1 \times 24,8} = 11,168 \quad (2.20)$$

En ambos casos, el monto de aire primario que será utilizado en la mezcla será de 50% (Fulford, 1996), aspecto que coincide con el rango de 40% a 60% de aire primario señalado en la primera propuesta. De esta forma, la relación de arrastre está definida como:

$$r_{ar} = 0,5 \times RAC_v \quad (2.21)$$

se obtiene:

- Para gas licuado de petróleo:  $r_{ar} = 14,661$
- Para gas natural:  $r_{ar} = 5,584$

De esta manera, el diámetro de la garganta ( $d_g$ ) del mezclador tipo venturi se puede determinar a través de la expresión formulada por Prigg para un quemador ideal

$$d_g = \left( \frac{r_{ar}}{\sqrt{s}} + 1 \right) \times d_i \quad (2.22)$$

en donde:

$d_g$  = Diámetro de la garganta del mezclador (mm)

$s$  = Densidad relativa del gas combustible

$r$  = Relación de arrastre

$d_i$  = Diámetro del inyector seleccionado (mm)

Obteniéndose lo siguiente:

- Para gas licuado de petróleo:  $d_g = 8.53$  mm
- Para gas natural:  $d_g = 8.28$  mm



Por último, siguiendo las mismas sugerencias mostradas en la Figura 2.2 (Modelo de Mezclador N°1) con respecto al largo del mezclador, y considerando un ángulo de entrada de  $40^\circ$  para la entrada convergente y un ángulo de salida de  $7^\circ$  para la sección divergente, se obtienen los siguientes modelos:

Para gas licuado de petróleo (GLP):

- El modelo GLP-4, con un diámetro de garganta de 8.5 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 21.3 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 102.4 mm.

Para gas natural:

- El modelo GN-4, con un diámetro de garganta de 8.3 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 20.7 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 99.4 mm.

### 2.2.3 Propuesta C. Lagarza

Se plantea el diseño de un mezclador que consiste solo de una entrada convergente (Lagarza, 2009), tal como se muestra en la Figuras 2.4 y 2.5. Los valores correspondientes a sus dimensiones se muestran en la Tabla 2.2

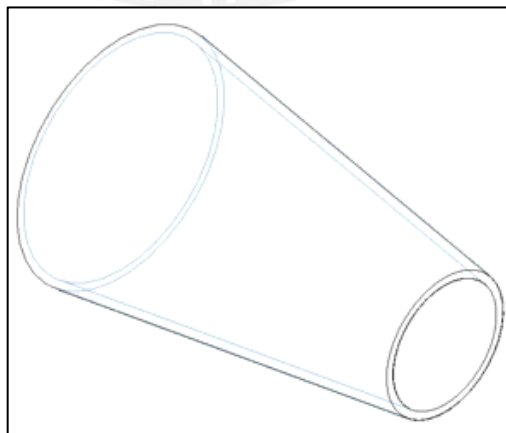


Figura 2.4. Mezclador propuesto en Análisis numérico del flujo en un mezclador de aire combustible para un quemador atmosférico (Lagarza, 2009)

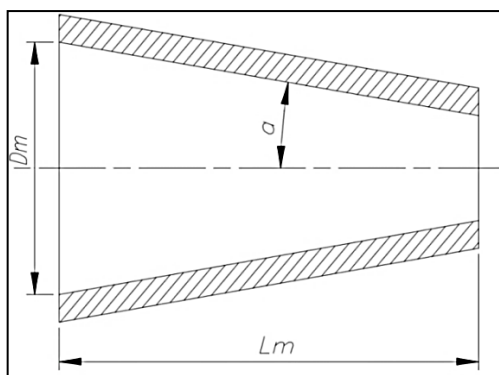


Figura 2.5. Modelo propuesto por C. Lagarza de perfil (Lagarza, 2009)

Tabla 2.1. Dimensiones de mezclador propuesto por C. Lagarza (Lagarza, 2009)

Longitud “Lm” (mm)	Ángulo de entrada convergente “a” (°)	Diámetro de entrada “Dm” (mm)
50	13.8	26.05

Se utilizará este modelo para ensayos con gas licuado de petróleo y gas natural, por lo que el modelo se denominará como GLP-5 cuando se use gas licuado de petróleo y GN-5 al emplear gas natural.

Por otro lado, basándose en el ángulo de entrada de este modelo, se procederá a elaborar un sexto mezclador para cada gas combustible. Es así que, tomando como base los modelos de mezcladores GLP-3 y GN-3 (ver Figura 2.3) solo se modificará el ángulo de entrada convergente de 40° a 13.8°.

Para gas licuado de petróleo (GLP):

- El modelo GLP-6, con un diámetro de garganta de 4.6 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 23 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 55.2 mm.

Para gas natural:

- El modelo GN-6, se diseñará con un diámetro de garganta de 10.3 mm, un largo de la sección de entrada del mezclador de una longitud de 51.5 mm, mientras que la sección divergente con un largo de 123.6 mm.

### 2.3. Características de los mezcladores diseñados

A continuación, se muestran la Figura 2.6 y la Tabla 2.2, los cuales ofrecen, a manera de resumen, una mejor visualización de las dimensiones de los mezcladores desarrollados.

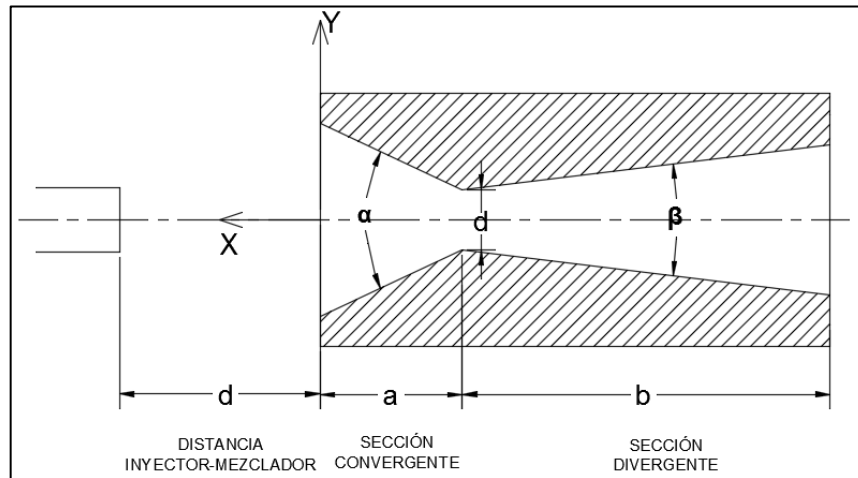


Figura 2.6. Esquema de modelos de mezcladores

Tabla 2.2. Dimensiones de mezcladores elaborados

Mezclador	Long. Sección convergente (mm)	Ángulo de entrada (°)	Diametro de garganta (mm)	Long. Sección divergente (mm)	Ángulo de salida (°)	Gas combustible
Modelo	"a"	" $\alpha$ "	"d"	"b"	" $\beta$ "	-
GLP-1	11,5	40	4,6	55.4	7	GLP
GLP-2	11.5	40	4.6	41.4	7	GLP
GLP-3	23	40	4.6	55.4	7	GLP
GLP-4	21.3	40	8.5	102.4	7	GLP
GLP-5	50	13.8	14	No presente	No presente	GLP
GLP-6	23	13.8	4.6	55.4	7	GLP
GN-1	25.7	40	10.3	123.6	7	GN
GN-2	25.7	40	10.3	92.7	7	GN
GN-3	51.5	40	10.3	123.6	7	GN
GN-4	20.7	40	8.3	99.4	7	GN
GN-5	50	13.8	14	No presente	No presente	GN
GN-6	51.5	13.8	10.3	123.6	7	GN

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Los modelos de mezcladores desarrollados deben ser sometidos a ensayos que permitan evaluar si la calidad de la mezcla aire-gas combustible desarrollada pueda generar un eficiente proceso de combustión. De esta manera se podrá determinar cuál diseño ofrece mejores resultados y reconocer el efecto generado por las diferencias en las dimensiones.

A continuación, se detallará el proceso de los ensayos a realizar, así como de los equipos a utilizar.

#### **3.1. Descripción de Procedimientos de Ensayos**

En la Figura 3.1 se muestran un esquema del montaje del mezclador en la cocina prototipo donde se realizarán los ensayos respectivos, así como el recorrido de la mezcla durante este proceso. Más adelante, se mostrarán imágenes con las estructuras elaboradas para un mayor entendimiento (Figuras 3.4, 3.6 y 3.7).

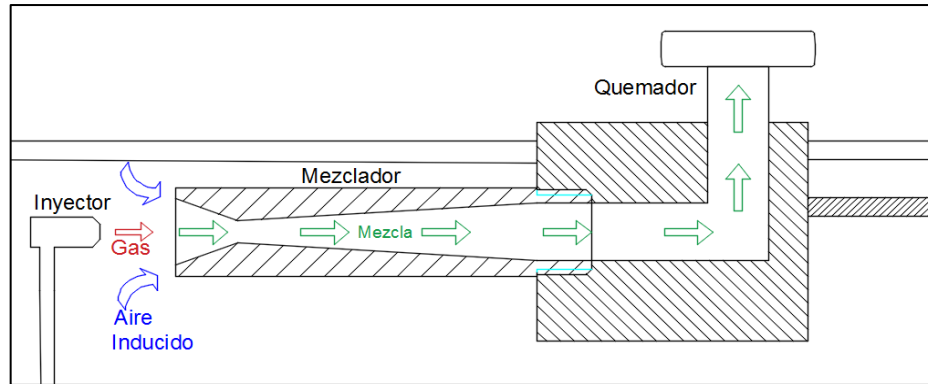


Figura 3.1. Esquema de la cocina y quemador de gas.

Para cada mezclador, es importante encontrar la distancia de separación más conveniente respecto al inyector, de manera que se posibilite una buena mezcla aire-gas, la cual permita el rendimiento térmico más alto durante su funcionamiento. Para esto, se establecerán diferentes puntos de ubicación para el inyector, separados en tramos de 0,5 cm, considerando a la entrada del mezclador como punto inicial, tal como se observa en la Figura 3.2. De manera que la longitud entre ambos elementos será denominada como distancia "d" a lo largo del presente estudio.

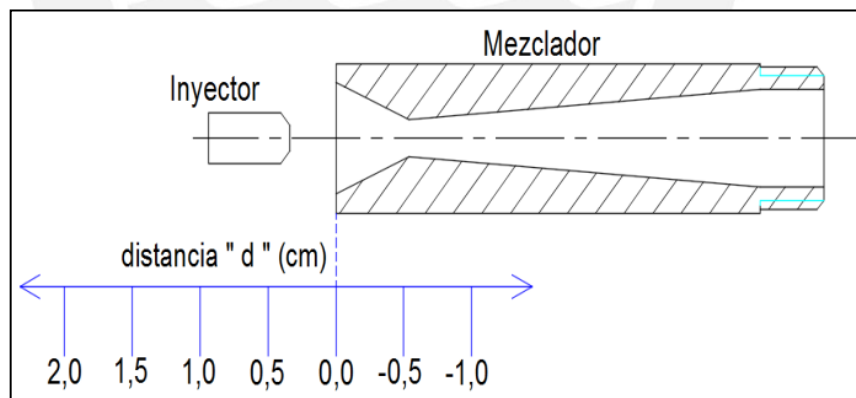


Figura 3.2. Esquema de variación de la distancia "d" entre el inyector y el mezclador

Establecido las diferentes posiciones para el inyector, se procederá con el proceso de análisis de rendimiento térmico para cada una de estas situaciones, considerando que en algunos casos no será posible realizar pruebas con el inyector dentro del mezclador ( $d < 0,0$  cm, ver Figura 3.3 (C)), debido a que las formas geométricas de ambos elementos impedirán la inserción del primero dentro del segundo o, como se verá más

adelante en imágenes del capítulo 4, el tamaño de la llama desarrollada en el quemador imposibilitará la ejecución de los ensayos. Asimismo, es importante recalcar que durante esta etapa inicial se mantendrá una separación de 1,0 cm entre la superficie inferior del recipiente de experimentación y el borde superior del quemador, donde se ubican sus orificios, durante las pruebas de rendimiento, hasta encontrar la distancia “d” óptima que ofrezca el mayor rendimiento.

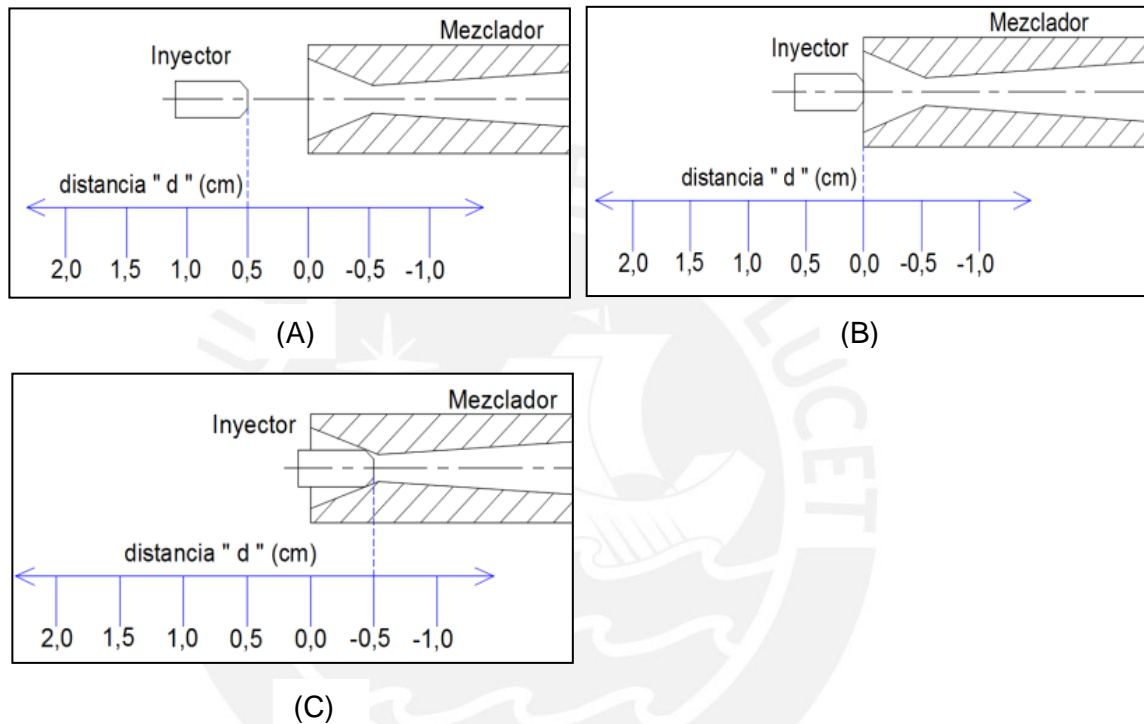


Figura 3.3. Ejemplos de variación de la distancia “d” entre el inyector y el mezclador:  
 (A)  $d=0,5$  cm; (B)  $d=0,0$  cm; (C)  $d=-0,5$  cm

Tras terminar con los ensayos de rendimiento térmico, se procederá con el análisis de la emisión de monóxido de carbono neutro provocado, partiendo del punto “0,0 cm” ( $d=0,0$  cm; ver Figura 3.3 (B)), para luego hacer lo mismo en cada tramo de 0,5 cm. Generando así las gráficas que permitan visualizar el efecto que ejerce la distancia inyector-mezclador, como las tendencias del cambio de rendimiento térmico y las emisiones de monóxido de carbono neutro para cada mezclador.

Para la realización de esta primera etapa se fabricó una estructura que permita desplazar el quemador con el mezclador, tal como se puede ver en la Figura 3.4, lo

cual permitirá cambiar su distancia respecto al inyector, el cual va montado sobre otra estructura.



Figura 3.4. Estructura diseñada para modificar la distancia "d" entre mezclador e inyector

Después de reconocer la distancia inyector-mezclador que permita obtener el rendimiento térmico más elevado, se procede a incrementar la separación entre el recipiente de ensayos (olla con agua) y la hornilla del quemador, la cual se representará con la letra "h" (ver Figura 3.5), empezando con la altura inicial de 1,0 cm ( $h=1,0$  cm) hasta una distancia de 3,0 cm ( $h=3,0$  cm), en tramos de 0,5 centímetros; analizando el impacto que esto puede ocasionar en lo que se refiere a rendimiento térmico y emisión de monóxido de carbono neutro. Para esta segunda etapa se desarrolló un componente adicional que facilite la elevación de la olla y permita sostener el conducto que transporta el gas hacia el (Figura 3.6).

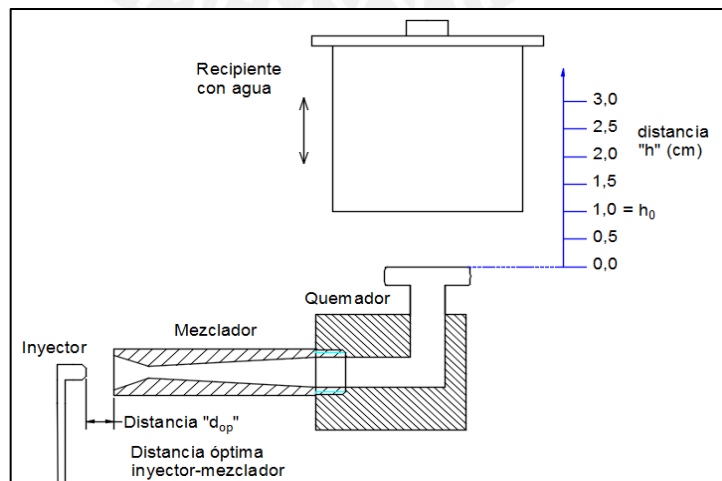
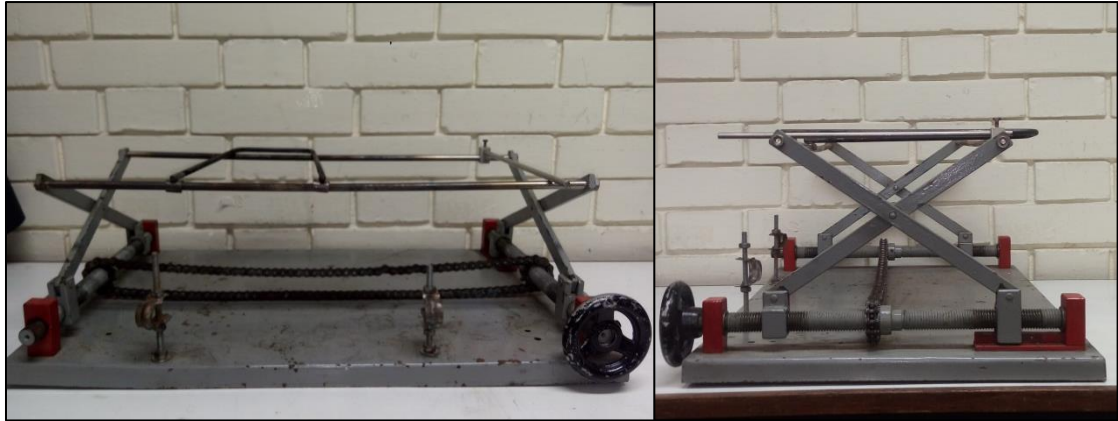


Figura 3.5. Esquema de variación de la altura "h" entre el quemador y la olla



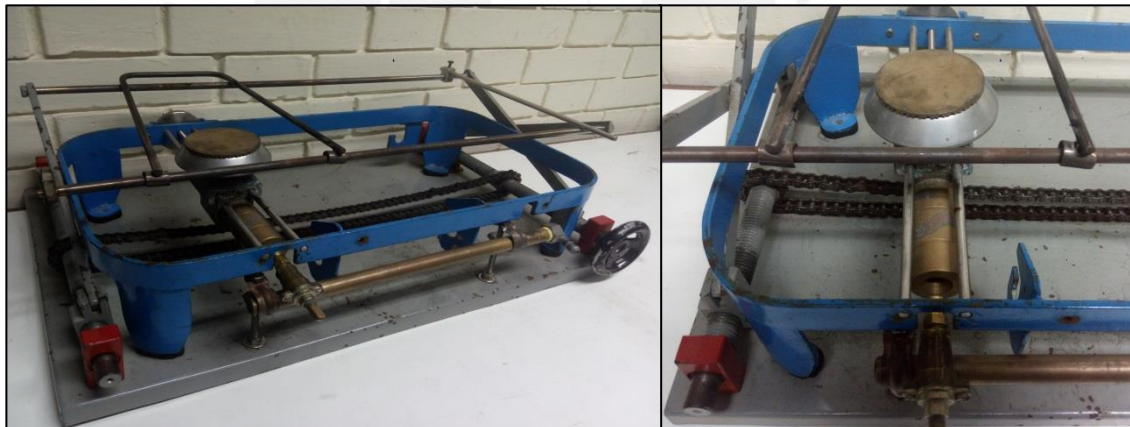


a)

b)

Figura 3.6. Estructura para modificar la distancia “h” entre quemador y olla: a) Vista frontal; b) Vista de perfil

Además, esta estructura posibilita un fácil montaje de la anterior (Figura 3.4) para que ambas puedan trabajar en conjunto, tal como se observa en la Figura 3.7.



a)

b)

Figura 3.7. Unión de estructuras: a) Imagen con conducto de gas; b) Inyector y mezclador

Finalmente, es importante destacar que se realizaron tres ensayos de rendimiento térmico en cada punto analizado, con el fin de tener una mayor muestra de los resultados y desarrollar un posterior análisis estadístico, cuyos resultados se mostrarán de manera más detallada en los Anexos.



### 3.2. Proceso para Análisis de Rendimiento Térmico

El rendimiento del proceso se determina mediante la división entre la energía consumida por el agua y la otorgada por el gas suministrado, de modo que se puede formular de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{E_{\text{agua}}}{E_{\text{gas}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

en donde:

$\eta$  = Rendimiento Térmico (%)

$E_{\text{agua}}$  = Energía consumida por el agua (kJ)

$E_{\text{gas}}$  = Energía otorgada por el gas (kJ)

Para calcular la energía proporcionada al agua se sigue lo establecido por la primera ley de la termodinámica; además, considerando que el líquido contenido en un recipiente se mantiene estático a lo largo del proceso, se le tratará como un sistema estacionario (Cengel & Boles, Termodinámica, 2009). De esta manera se obtiene lo siguiente:

$$E_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} \cdot (u_f - u_i) \quad (3.2)$$

en donde:

$m_{\text{agua}}$  = Masa de agua (kg)

$u_f$  = Energía interna del agua al final del proceso del calentamiento (kJ/kg)

$u_i$  = Energía interna del agua al inicio del proceso del calentamiento (kJ/kg)

Durante los ensayos, se procede a incrementar la temperatura del agua a una presión constante. Por lo tanto, el valor de la energía consumida por el agua se expresa como:

$$E_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} \cdot C_{\text{agua}}(T_f - T_i) \quad (3.3)$$

en donde:

$C_{\text{agua}}$  = Calor Específico de agua (kJ/kg.°C)

$T_f$  = Temperatura Final del agua (°C)

$T_i$  = Temperatura Inicial del agua (°C)

Por otro lado, la energía otorgada por el gas combustible se determina mediante la medición del caudal del flujo del gas que es expulsado a través del inyector y el tiempo que transcurre durante el calentamiento del agua de 20°C hasta 90°C. Es así que la energía proporcionada por el gas combustible es:

$$E_{\text{gas}} = \dot{Q}_{\text{gas}} \cdot t_a \cdot \text{PCI} \quad (3.4)$$

en donde:

$\dot{Q}_g$  = Caudal del gas combustible (m<sup>3</sup>/min)

$t_a$  = Tiempo requerido para calentar el agua (min)

PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/ m<sup>3</sup>)

Cabe mencionar que para la realización de los ensayos se siguieron los pasos establecidos por la norma NCh927/1, la cual señala que el rendimiento obtenido debe ser mayor a 58% con PCI y 52% si se utiliza PCS (Instituto de Normalización Chilena, 2008). Se optó por esta norma ya que no se ha desarrollado alguna similar para el caso peruano hasta la fecha y por las semejanzas de las condiciones ambientales presentes entre el lugar donde se realizan los ensayos (Lima) y gran parte de Chile. Sin embargo, dependiendo de las condiciones ambientales, podrían realizarse algunos cambios, como las temperaturas iniciales y finales del agua durante la experimentación, pero manteniendo la misma diferencia entre ambos valores (70°C), aspecto que debe considerarse si se desea realizar este ensayo en otras partes del país donde la temperatura es menor a la de Lima.

Es así que, siguiendo con lo estipulado por la norma NCh927/1, el recipiente a utilizar para las pruebas debe ser una olla hecha de aluminio de 22 cm de diámetro, en la cual se vierte agua para ser calentada desde 20°C a 90°C de temperatura, registrando el tiempo transcurrido durante este proceso. Las medidas empleadas están descritas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de las variables para los ensayos (Instituto de Normalización Chilena, 2008)

Variable	Unidad	Valor	Incertidumbre de Lectura
Masa de agua	kg	3.439	+/- 0.0005
Calor específico del agua	kJ/(kg · K)	4.186	-
Temperatura inicial del agua	K	293	+/- 0.005
Temperatura final del agua	K	363	+/- 0.005

### 3.2.1. Instrumentación para Análisis Térmico

Para el correcto desarrollo de los ensayos se cuenta con una variedad de equipos de medición que permiten verificar que se trabaje bajo las condiciones requeridas. Estos posibilitan el registro de los valores que corresponden al caudal y presión del gas combustible, la temperatura del agua y las condiciones ambientales. Para lo cual era importante realizar la calibración de estos elementos diariamente, a fin de garantizar una correcta medición de los valores; es así que para la calibración de los instrumentos que indicaban la presión se utilizó un manómetro patrón (digital). En la Tabla 3.2 se muestra mayor detalle de los instrumentos utilizados los cuales se instalaron de manera que permitan montar un sistema que regule y mida el flujo de los gases combustibles que se utilicen durante los ensayos, conservando las mismas condiciones de trabajo para todos los ensayos.

Asimismo, en la Figura 3.8 se muestra un esquema de los instrumentos y válvulas requeridas en las líneas de gas natural y gas licuado de petróleo (GLP) para los ensayos realizados para calcular el rendimiento térmico,

Tabla 3.2.Equipos de medición

<b>Instrumento</b>	<b>Rango</b>	<b>Precisión</b>	<b>Condiciones</b>
Indicador de temperatura ambiental	-20 a 80 °C	+/- 0,3 °C +/- 0,4 °C	De 0 a 70°C Restante
Indicador de humedad	0 a 100 %	+/- 2,0 % +/- 2,5 %	De 10 a 90% RH Restante
Indicador de presión atmosférica	600 a 1100 mbar	+/- 0,5 mbar	
Termocupla tipo K	0 a 500 °C	+/- 2,5 %	
Medidor de flujo	0 a 50 LPM	+/- 0,8% de la lectura +/- 0,2% full	Max presión de línea: 145 PSI. Temperatura de operación:-10 a +50°C
Manómetro Digital	0 a 2 bar	0,05%FE	Resolución: 0,1 mbar Temperatura de trabajo: 0 a 50°C
Manómetros Analógicos	0 a 60 mbar	+/- 2 mbar	Temperatura de trabajo: De -10 a 60°C
	0 a 4 bar	+/- 0,2 mbar	
	0 a 16 bar	+/- 0,5 mbar	
Regulador de presión de GLP	Presión de salida de 0,23 a 0,32 mbar		Caudal máximo: 20 kg/h
Regulador de presión de gas natural	Presión de salida de 0,015 a 2,5 bar		Caudal máximo: 128 m³/h en gas natural

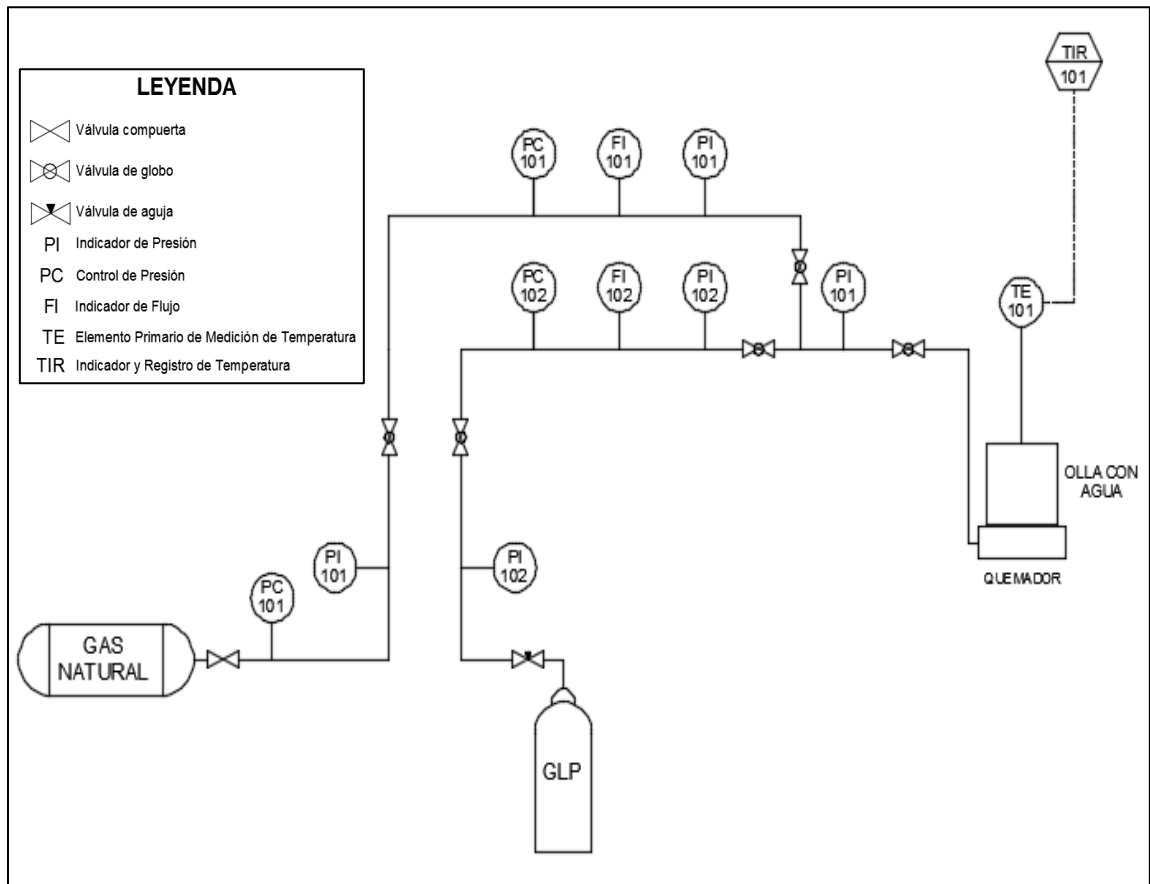


Figura 3.8. Sistema de medición para determinar el rendimiento térmico

### 3.3. Proceso de análisis de emisión de monóxido de carbono neutro

El procedimiento de los ensayos consiste en hacer uso de una olla de 22 cm con 3,7 kg de agua y una campana que posea las dimensiones indicadas en la norma NCh 927/1.

Las pruebas consisten en calentar el agua contenida en la olla, con la campana (ver Figura 3.9) instalada sobre esta, de modo que dirija las emisiones de la combustión durante la ebullición, a través de un tubo de cobre, hacia el analizador de gases.



Figura 3.9. Campana utilizada en ensayos

Para estos ensayos se hará uso de un equipo analizador de gases KM9106 Quintox (ver Figura 3.10), el cual permite monitorear los gases de combustión generados por medio de una sonda con un eje de acero inoxidable, con una termocupla integrada.



Figura 3.10. Equipo analizador de gases KM9106 Quintox

De modo que para estimar el contenido de monóxido de carbono (CO) referido a los productos de la combustión exentos de aire y vapor de agua (combustión neutra) se sigue la siguiente fórmula (Instituto de Normalización Chilena, 2008):

$$CO_N = CO_{2N} * \frac{CO_M}{CO_{2M}} \quad (3.5)$$

en donde:

$CO_N$  = Monóxido de carbono neutro, considerado para los productos de combustión exceptuando el aire y el vapor de agua (%)

$CO_{2N}$  = Dióxido de carbono neutro para la combustión del gas considerado, exento de aire y vapor de agua (%)

$\frac{CO_M}{CO_{2M}}$  = Relación de  $CO$  y  $CO_2$ , la cual es medida y registrada mediante el equipo

analizador de gases durante los ensayos (%)

En la Tabla 3.3 se indica los valores del porcentaje de dióxido de carbono neutro  $CO_{2N}$  para los gases a usar durante las pruebas.

Tabla 3.3. Gases y respectivos valores de  $(CO_2)_N$  % (Instituto de Normalización Chilena, 2008), \* (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2000)

Designación del gas	Gas Natural	GLP*
$(CO_2)_N$ %	11,9	13,79

### 3.4. Condiciones Ambientales

Los mezcladores fueron diseñados según las condiciones dadas en uno de los ambientes de la facultad de ingeniería mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en Lima. Considerando así una altura sobre el nivel del mar de aproximadamente 100 m, la cual es una aproximación de la ubicación donde las pruebas se darán, teniendo así como presión atmosférica  $1,002 \times 10^3$  mbar (ver ec.2.5). Además, la temperatura ambiental registrada durante los ensayos se encuentra en un rango de 21°C - 25°C, mientras que la humedad relativa puede variar de 60% a 70%.

### 3.5. Análisis estadístico en ámbito experimental

Los resultados obtenidos presentan un cierto nivel de variabilidad, generado por la presencia de diversos factores, los cuales afectan el resultado de la medición. Es así que debe considerarse el error provocado por las incertidumbres de lectura

establecidas por los equipos de medición, probables fallas en las mediciones debido al operador y la presencia de agentes externos. A continuación, se dará una descripción de estos tres elementos:

### 3.5.1. Incertidumbre de Lectura

El grado de incertidumbre de lectura está asociado con la exactitud de medición de los instrumentos y diversos aparatos utilizados en los ensayos, lo que representa una fuente de error. Por lo tanto, esta incertidumbre se toma como la mitad de la división más pequeña de la escala de medición del instrumento, tomando en cuenta que debe coincidir con las cifras significativas del elemento usado para la medición.

Los instrumentos de medición que tienen una influencia directa en los resultados de los ensayos son: el flujómetro, el manómetro digital, la termocupla tipo K, la cual mide la temperatura del agua, y el cronómetro; cuyos valores de incertidumbre de lectura estimados son mostrados en la Tabla 3.4. Estos datos posibilitarán el cálculo de la propagación de incertidumbres arrastrada durante la toma de datos en los ensayos, mediante las ecuaciones correspondientes para cada uno de los diferentes mezcladores.

Tabla 3.4. Incertidumbre de lectura de equipos

Instrumento de medición	Incertidumbre	Unidades
Caudalímetro	$\pm 0.01$	l/min
Termocupla	$\pm 0.01$	°C
Manómetro digital	$\pm 0.01$	mbar
Temperatura ambiental	$\pm 0.1$	°C
Humedad Relativa	$\pm 0.1$	%
Masa del agua	$\pm 0.001$	kg
Cronómetro	$\pm 0.01$	s

Basándose en la ecuación 3.1, la incertidumbre de lectura para el rendimiento térmico alcanzado en cada ensayo estará expresada de la siguiente manera:



$$n + \sigma_L = \frac{E_{\text{agua}} \pm \Delta E_{\text{agua}}}{E_{\text{gas}} \pm \Delta E_{\text{gas}}} \quad (3.6)$$

en donde:

$\sigma_L$  = Incertidumbre de Lectura correspondiente al rendimiento térmico (%)

$\Delta E_{\text{gas}}$  = Incertidumbre de la energía que se proporciona por el gas combustible (kJ)

$\Delta E_{\text{agua}}$  = Incertidumbre de la energía que se proporciona al agua (kJ)

Para determinar la incertidumbre de la energía proporcionada por el gas combustible ( $\Delta E_{\text{gas}}$ ) se debe partir de la ecuación 3.4, donde hay dos variables con incertidumbres de lectura presentes: el caudal medido por el flujómetro y el tiempo de duración evaluado con el cronómetro. El producto de ambas magnitudes, con sus respectivas incertidumbres, se desarrollará de la siguiente manera (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003):

$$(\dot{Q}_g + \Delta \dot{Q}_g) \cdot (t_a + \Delta t_a) = V_{\text{cons}} + \Delta V_{\text{cons}} \quad (3.7)$$

en donde:

$\Delta V_{\text{cons}}$  = Incertidumbre en el volumen del gas combustible consumido ( $\text{m}^3$ )

$\Delta t_a$  = Incertidumbre del tiempo requerido para calentar el agua (s)

$\Delta \dot{Q}_g$  = Incertidumbre del flujo del combustible utilizado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$V_{\text{cons}}$  = Volumen del gas combustible consumido ( $\text{m}^3$ )

$t_a$  = Tiempo requerido para calentar el agua, medida a través del cronómetro (s)

$\dot{Q}_g$  = Flujo del combustible utilizado medido a través del flujómetro ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Posteriormente, al seguir desarrollando la ecuación se obtiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_g t_a + \dot{Q}_g \Delta t_a + \Delta \dot{Q}_g t_a + \Delta \dot{Q}_g \Delta t_a = V_{\text{cons}} + \Delta V_{\text{cons}} \quad (3.8)$$

Asumiendo que las incertidumbres son pequeñas respecto a las magnitudes mismas, se permite menospreciar el término  $\Delta \dot{Q}_g \cdot \Delta t_a$  frente a  $\dot{Q}_g \Delta t_a$  y  $\Delta \dot{Q}_g t_a$ . Además, se debe tomar en cuenta que los términos  $\dot{Q}_g t_a$  y  $V_{\text{cons}}$  son lo mismo y, por ende, poseen el mismo valor. De manera que se obtiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_g \Delta t_a + \Delta \dot{Q}_g t_a = \Delta V_{\text{cons}} \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{\Delta t_a}{t_a} + \frac{\Delta \dot{Q}_g}{\dot{Q}_g}\right) \cdot V_{cons} = \Delta V_{cons} \quad (3.10)$$

De manera que la incertidumbre correspondiente al cálculo de la energía producida por el gas combustible (ver ecuación 3.4) se obtiene de la siguiente manera:

$$E_{gas} + \Delta E_{gas} = (\dot{Q}_g + \Delta \dot{Q}_g) \cdot (t_a + \Delta t_a) \cdot PCI \quad (3.11)$$

$$E_{gas} + \Delta E_{gas} = (V_{cons} + \Delta V_{cons}) \cdot PCI$$

$$\Delta E_{gas} = V_{cons} \cdot PCI + \Delta V_{cons} \cdot PCI - E_{gas}$$

$$\Delta E_{gas} = E_{gas} + \Delta V_{cons} \cdot PCI - E_{gas}$$

$$\Delta E_{gas} = \Delta V_{cons} \cdot PCI$$

$$\Delta E_{gas} = \left(\frac{\Delta t_a}{t_a} + \frac{\Delta \dot{Q}_g}{\dot{Q}_g}\right) \cdot V_{cons} \cdot PCI$$

$$\Delta E_{gas} = \left(\frac{\Delta t_a}{t_a} + \frac{\Delta \dot{Q}_g}{\dot{Q}_g}\right) \cdot E_{gas} \quad (3.12)$$

en donde:

$PCI$  = Poder Calorífico Inferior ( $\text{KJ}/\text{m}^3$ )

$E_{gas}$  = Energía que se proporciona por el gas combustible (kJ)

Asimismo, para el análisis del error arrastrado en el cálculo de la energía proporcionada al agua ( $\Delta E_{agua}$ ), se debe considerar las siguientes variables asociadas: la temperatura del agua medida a través de la termocupla y la masa del agua requerida (ver ecuación 3.3). Para ello, se debe partir de la siguiente expresión:

$$E_{agua} + \Delta E_{agua} = [(m_{agua} + \Delta m_{agua}) \cdot ((T_{f+} + \Delta T) - (T_i + \Delta T))] \cdot C_{agua} \quad (3.13)$$

en donde:

$E$  = Energía proporcionada al agua (kJ)

$\Delta E_{agua}$  = Incertidumbre de la energía que se proporciona al agua (kJ)

$m_{agua}$  = Medición de masa de agua usada durante el ensayo (kg)

$\Delta m_{agua}$  = Incertidumbre de la medición de masa de agua usada durante el ensayo (kg)

$T_f$  = Temperatura final del agua (°C)

$T_i$  = Temperatura inicial del agua (°C)

$\Delta T$  = Incertidumbre de temperatura medida a través de la termocupla (°C)

$C_{agua}$  = Calor específico del agua (kJ/kg °C)

Con respecto a la diferencia de las temperaturas mostradas en la última ecuación (3.13), se debe indicar que se restan solo las magnitudes, mientras que el valor de la incertidumbre resultante de esta diferencia es la suma de las incertidumbres de las magnitudes. Si se restaran las incertidumbres se tendría  $\Delta T_{(T_f-T_i)}=0$ , lo cual sería un resultado absurdo, ya que de dos medidas inciertas obtendríamos un valor preciso (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003).

$$E_{agua} + \Delta E_{agua} = [(m_{agua} + \Delta m_{agua}) \cdot ((T_f - T_i) + (2\Delta T))] \cdot C_{agua} \quad (3.14)$$

Considerándose que el producto  $\Delta m_{agua} \cdot 2\Delta T$  es tan pequeño que puede menospreciarse, tal como se hizo en la ecuación 3.8, se obtiene lo siguiente

$$E_{agua} + \Delta E_{agua} = [m_{agua}2\Delta T + (T_f - T_i)\Delta m_{agua} + m_{agua}(T_f - T_i)] \cdot C_{agua} \quad (3.15)$$

$$E_{agua} + \Delta E_{agua} = \left[ \left( \frac{2\Delta T}{(T_f - T_i)} + \frac{\Delta m_{agua}}{m_{agua}} \right) \cdot (m_{agua}(T_f - T_i)) \right] \cdot C_{agua} + m_{agua}(T_f - T_i) C_{agua} \quad (3.16)$$

$$E_{agua} + \Delta E_{agua} = \left( \frac{2\Delta T}{(T_f - T_i)} + \frac{\Delta m_{agua}}{m_{agua}} \right) \cdot E_{agua} + E_{agua} \quad (3.17)$$

$$\Delta E_{agua} = \left( \frac{2\Delta T}{(T_f - T_i)} + \frac{\Delta m_{agua}}{m_{agua}} \right) \cdot E_{agua} \quad (3.18)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.12 y 3.18 en la 3.6 se obtiene:

$$\sigma_L = \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{\Delta m_{agua}}{m_{agua}} \right) + \left( \frac{2\Delta T}{(T_f - T_i)} \right) \right] \cdot E_{agua}}{E_{agua}} + \frac{\left( \frac{\Delta t_a}{t_a} + \frac{\Delta \dot{Q}_g}{\dot{Q}_g} \right) \cdot E_{gas}}{E_{gas}} \right\} \cdot n \quad (3.19)$$

Finalmente, se determina la ecuación para estimar la incertidumbre de lectura

$$\sigma_L = \left[ \left( \frac{\Delta m_{\text{agua}}}{m_{\text{agua}}} \right) + \left( \frac{2\Delta T}{(T_f - T_i)} \right) + \left( \frac{\Delta t_a}{t_a} + \frac{\Delta \dot{Q}_g}{\dot{Q}_g} \right) \right] \cdot n \quad (3.20)$$

### 3.5.2. Incertidumbre por Errores Externos

Representan las otras fuentes de incertidumbre que pueden generar oscilaciones en los resultados de la medición. Se pueden considerar dentro de esta categoría las siguientes fuentes de error:

- Error por agentes externos

En este punto se clasifican las influencias en el ambiente que están fuera del alcance del operador y que no pueden regularse; tales como el viento, la temperatura ambiental y la humedad atmosférica (Bisso, 2015).

- Errores ocasionado por el operador

Al depender los ensayos de los sentidos del operador, existe la posibilidad de errores en la lectura de los instrumentos de medición (Bisso, 2015), tales como el flujómetro o el cronómetro, o de mal posicionamiento de los elementos de trabajo, tales como la olla con agua o el mezclador. Es así que se realizaron tres ensayos para cada punto analizado, de modo que se tenga una mayor certeza en los valores obtenidos. El valor central  $\bar{x}$  se calcula a través de la media aritmética de las medidas  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (3.13)$$

Sin embargo, en caso de que las incertidumbres de cada uno de los ensayos ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) en un mismo punto no sean iguales, se debe determinar el valor central  $\bar{x}$  mediante la media ponderada (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003):

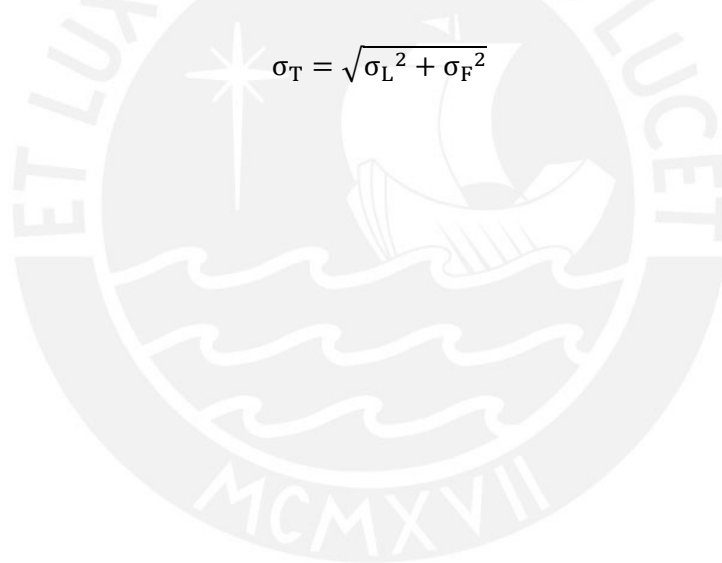
$$\bar{x} = \frac{\frac{x_1}{\sigma_1^2} + \frac{x_2}{\sigma_2^2} + \frac{x_3}{\sigma_3^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2}} \quad (3.14)$$

Posteriormente, la incertidumbre debida a las fluctuaciones ( $\sigma_F$ ), obtenida tras los resultados de tres ensayos, se calcula de la siguiente manera (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003):

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{3 \cdot (3 - 1)}} \quad (3.15)$$

Finalmente, la incertidumbre total ( $\sigma_T$ ), la cual representa la combinación de la incertidumbre de lectura y de fluctuaciones, se estima con la siguiente formula (Thompson, Rivera, & Pereyra, 2003):

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_F^2} \quad (3.16)$$



## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo, se muestran los resultados de los ensayos con los mezcladores desarrollados, los cuales estarán divididos en dos grupos, los realizados con gas licuado de petróleo (GLP) y los ejecutados con gas natural. Se presentarán gráficas que señalan las tendencias del rendimiento térmico y de las emisiones de monóxido de carbono neutro  $(CO)_N$ , debido al cambio de las longitudes inyector-mezclador (distancia “d”) y quemador-recipiente con agua (altura “h”). Además, se comparará lo obtenido con los límites establecidos por la norma NCh927/1, de manera que el rendimiento térmico debe ser mayor a 58%, mientras que el porcentaje de monóxido de carbono neutro  $(CO)_N$  menor al 0,1% (Instituto de Normalización Chilena, 2008).

Por otra parte, se presentan las formas de las llamas obtenidas durante la experimentación con los mezcladores, denotando el cambio que puede generarse al variar solo la distancia “d” inyector–mezclador. Las llamas mostradas serán las correspondientes al punto de mayor rendimiento térmico, la mayor distancia posible en la que el inyector puede introducirse dentro del mezclador y en el instante en que el inyector está más alejado al mezclador. Los cuadros con los resultados se muestran en los Anexos A y B.

## 4.1. Evaluación de los mezcladores con GLP

### 2.1.1. Mezclador GLP-1

Siguiendo los resultados de los ensayos en el mezclador GLP-1, mostrados en la Figura 4.1, el rendimiento térmico más elevado se obtiene si la distancia entre el inyector y el mezclador es de 0 cm ( $d=0,0$  cm); sin embargo, no supera el mínimo valor requerido (58%). Además, los niveles de porcentaje de emisión de  $(CO)_N$  están por encima de lo máximo admisible (0,1%).

En la Figura 4.2 se puede observar que la llama adquiere un color rojizo, así como un estado muy inestable, cuando el inyector está introducido 0,5 cm dentro del mezclador ( $d=-0,5$  cm) debido al reducido ingreso de aire en la mezcla. Por lo tanto, a estas circunstancias no se pueden realizar las pruebas correspondientes, pues representa un peligro para el operador.

En la Figura 4.3 se evidencia los efectos de elevar la distancia que existe entre el recipiente con agua y la hornilla hasta 3 cm ( $h=3,0$  cm), conservando la longitud entre el inyector y el mezclador que ofrece el mayor rendimiento, la cual es de 0 cm ( $d=0,0$  cm) según la Figura 4.1. Se muestra una tendencia a un menor porcentaje de emisión del monóxido de carbono neutro, hasta estar cerca de lo permisible (0,1%) cuando la altura es de 3 cm ( $h= 3,0$  cm), aunque también existe una reducción en el rendimiento térmico hasta niveles por debajo de lo permisible (58%).

En lo que respecta a las incertidumbres estimadas para los rendimientos térmicos alcanzados con el presente modelo (ver Tablas A.1 y A.2 en Anexo A), ninguna supera el 1,00 %. A su vez, ninguna de estas puede representar una variación en los resultados que signifique el estar dentro o fuera del límite establecido para cumplir con la norma NCh927/1.

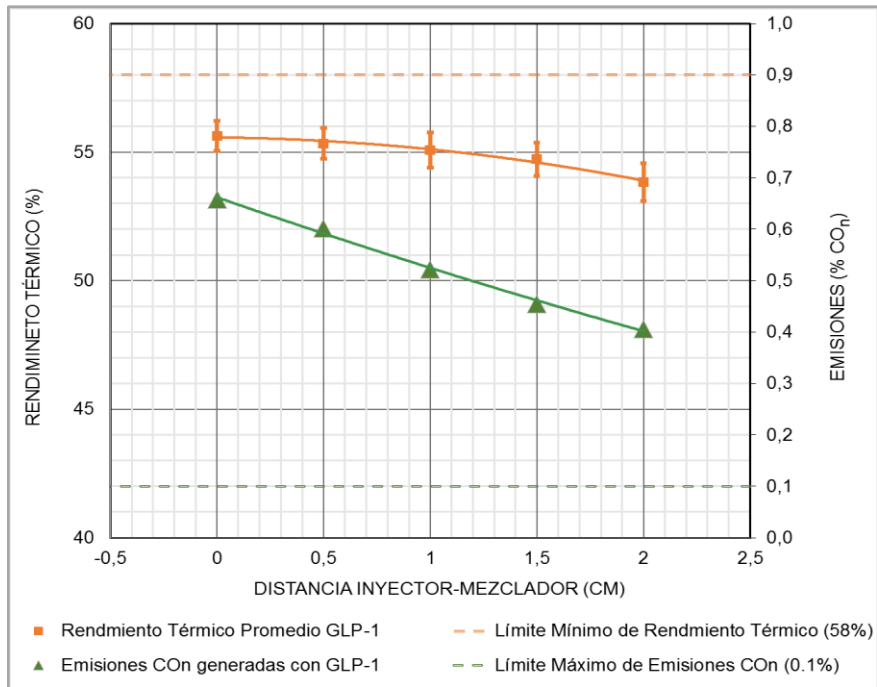


Figura 4.1. Rendimiento térmico y emisiones de (CO)<sub>N</sub> influenciados por distancia “d” mezclador-inyector en mezclador GLP-1, para h=1,0 cm

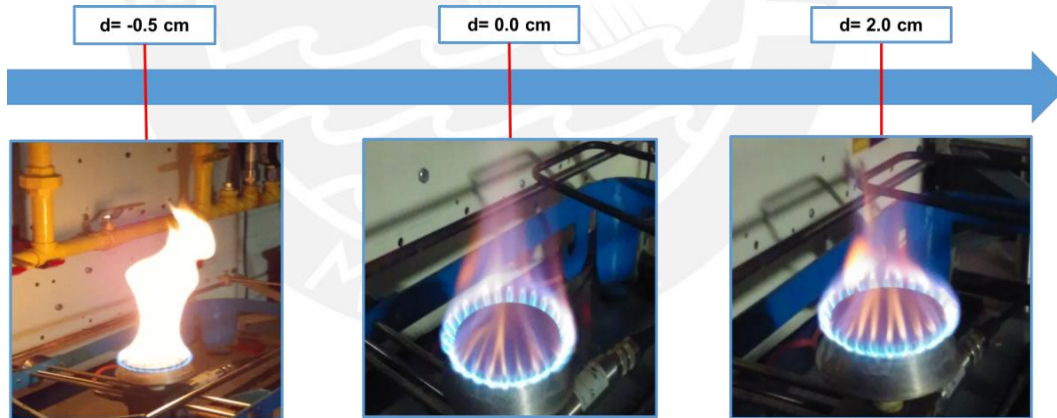


Figura 4.2. La llama en el mezclador GLP-1, para h=1,0 cm



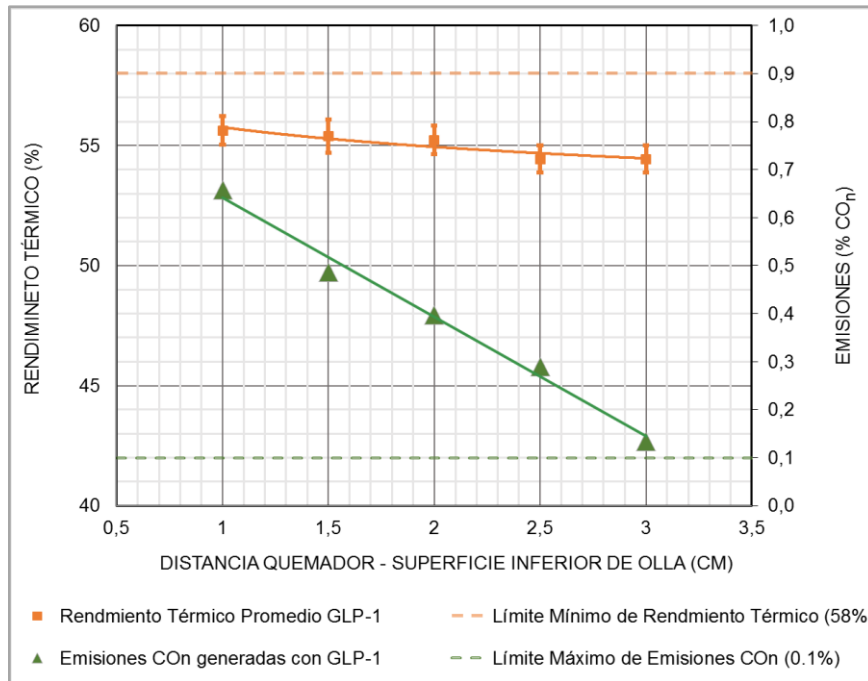


Figura 4.3. Rendimiento térmico y emisiones de (CO)<sub>N</sub> influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-1, para d=0,0 cm

### 2.1.2. Mezclador GLP-2

Según los resultados mostrados en la Figura 4.4, en el mezclador GLP-2 la distancia óptima entre el inyector y el mezclador es de 0,5 cm ( $d=0,5$  cm), aunque esta no supera el mínimo nivel de rendimiento térmico admisible (58%) si se considera sólo el promedio de los ensayos correspondientes en ese punto, pero al tomarse en cuenta la incertidumbre total ( $\pm 0,72$  %) no puede asegurarse que su rendimiento térmico a esas condiciones siempre esté por debajo de 58% (ver Tabla A.3 del anexo A.). Por su parte, las emisiones de (CO)<sub>N</sub> están por encima de lo máximo recomendado.

Además, puede verse en la Figura 4.5 que, al igual que con el mezclador GLP-1, la llama obtiene una tonalidad totalmente amarilla cuando el inyector está muy introducido en el inyector ( $d=-1,0$  cm); lo que representa un aumento de emisiones de monóxido de carbono neutro (CO)<sub>N</sub> y un pobre aprovechamiento de la energía brindada por el combustible. Cabe indicar que no se realizaron ensayos con el inyector dentro del mezclador ( $d= -1$  cm y  $d=-0,5$  cm) por el riesgo que involucra acercarse.

En la figura 4.6 se puede ver que, al igual que lo mostrado en la Figura 4.3 correspondiente al mezclador GLP-1, en este modelo las emisiones de Monóxido de Carbono Neutro ( $\text{CO}_N$ ) se reducen a medida que se eleva la altura entre el quemador y superficie inferior del recipiente (altura “h”); sin embargo, no se obtiene un valor cercano al valor límite de ( $\text{CO}_N$ ) permitido por la norma NCh927/1 (0,1%).

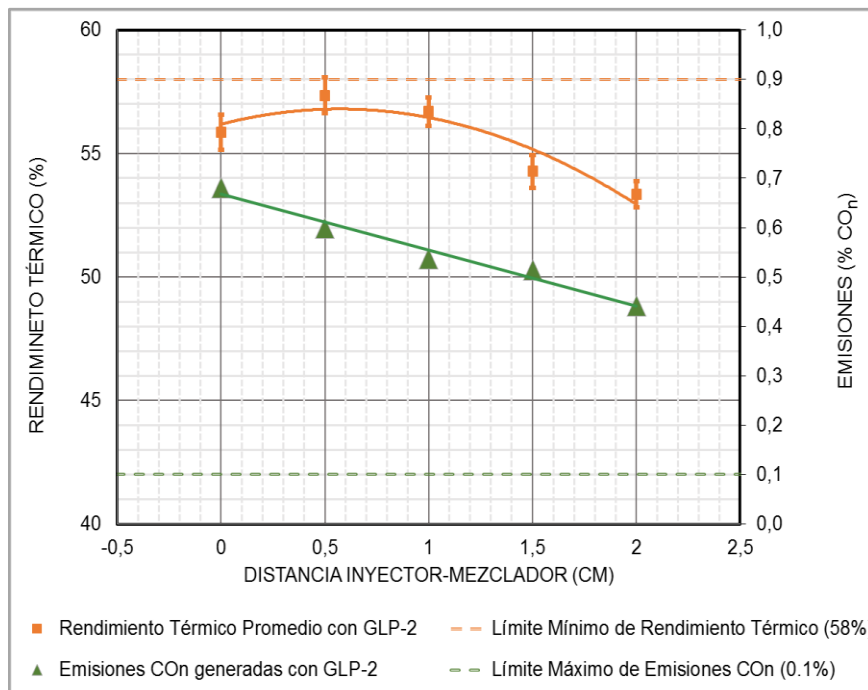


Figura 4.4. Rendimiento térmico y emisiones de ( $\text{CO}_N$ ) influenciados por distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-2, para h=1,0 cm



Figura 4.5. La llama en el mezclador GLP-2, para h=1,0 cm

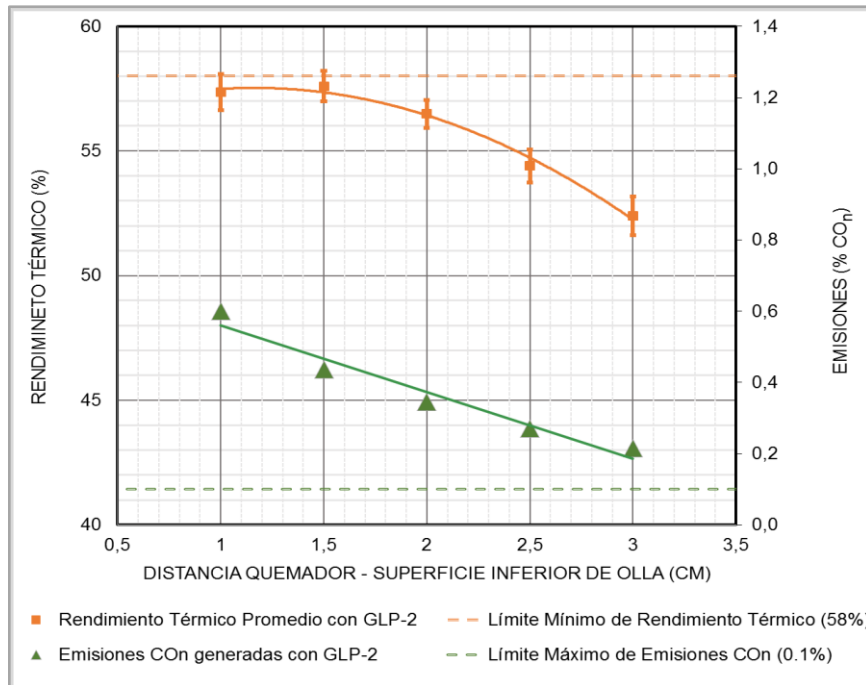


Figura 4.6. Gráfico de Rendimiento y emisiones de (CO)<sub>N</sub> influenciados por la altura “h” quemador-olla en el mezclador GLP-2, para d= 0,5 cm

### 2.1.3. Mezclador GLP-3

En el mezclador GLP-3, siguiendo lo mostrado en Figura 4.7, se obtuvo el punto de rendimiento térmico más alto cuando la distancia entre el inyector y el mezclador fue de 0,0 cm (d=0,0 cm); sin embargo, no supera el límite mínimo requerido (58%), ni los valores más elevados de los mezcladores GLP-1 y GLP-2. A su vez, se muestran niveles de emisiones de (CO)<sub>N</sub> por encima del límite máximo.

Asimismo, en la Figura 4.8 puede reconocerse visualmente que no existe diferencia notoria en las llamas cuando se incrementa la distancia “d” entre mezclador e inyector de 0,0 cm a 1,5 cm, a pesar que en la Figura 4.7 se registra una reducción del rendimiento térmico y de emisiones de monóxido de carbono neutro al alejar 1,5 cm el inyector del mezclador.

En la Figura 4.9 se muestran los resultados tras mantener la distancia entre el inyector y mezclador de 0,0 cm (d=0,0 cm), con la que se obtiene el mayor rendimiento térmico según lo visto en la Figura 4.7, mientras se incrementa la altura “h” entre el recipiente

con agua y el quemador. Aquí se muestra que desde la altura inicial de 1,0 cm ( $h= 1,0$  cm) hasta 2,5 cm ( $h=2,5$  cm) no existe una variación considerable en el rendimiento térmico (ver anexo A, Tabla A.5); sin embargo, las emisiones de monóxido de carbono neutro presentan una reducción, en promedio, de 15% cada vez que se aleja 0,5 centímetros la olla del quemador.

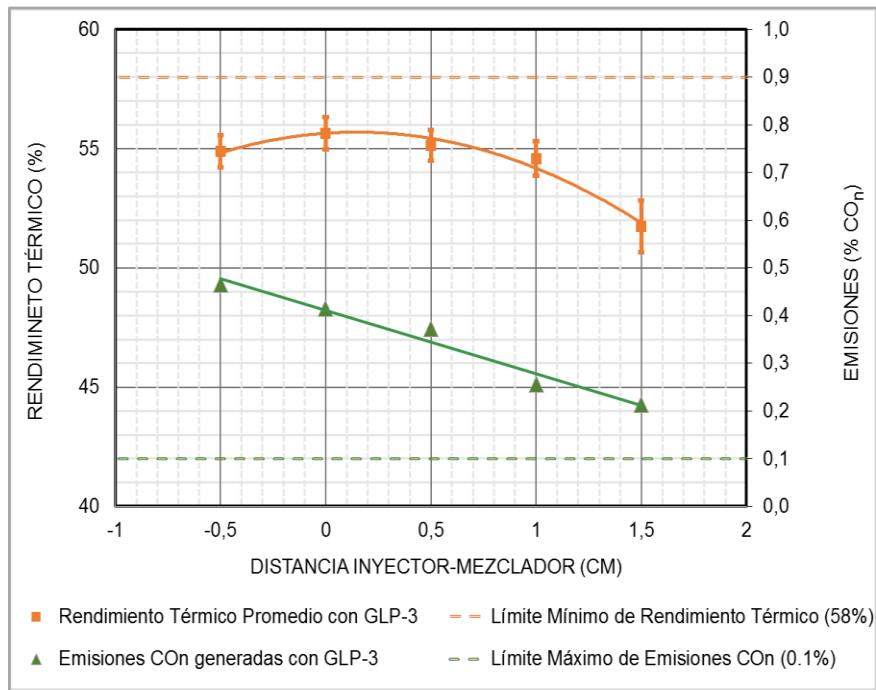


Figura 4.7. Rendimiento térmico y emisiones de (CO)<sub>N</sub> influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-3, para  $h=1,0$  cm

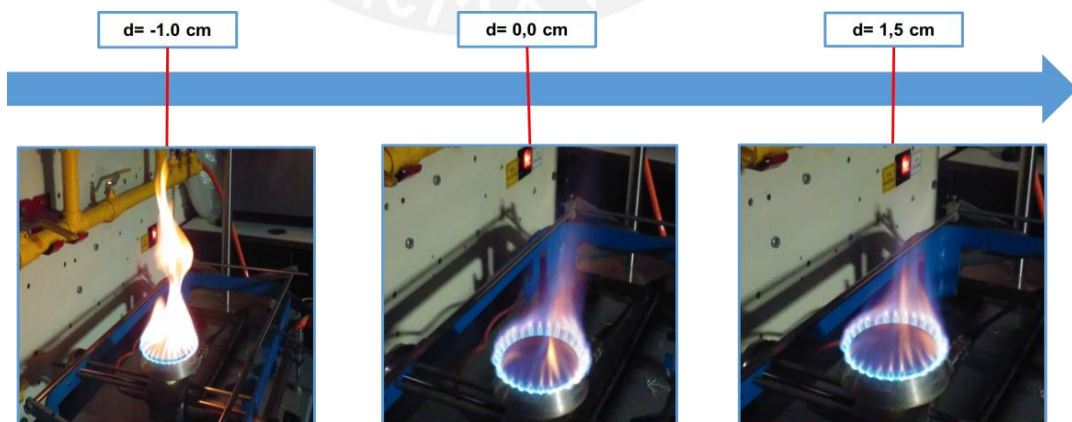


Figura 4.8. La llama en el mezclador GLP-3, para  $h=1,0$  cm

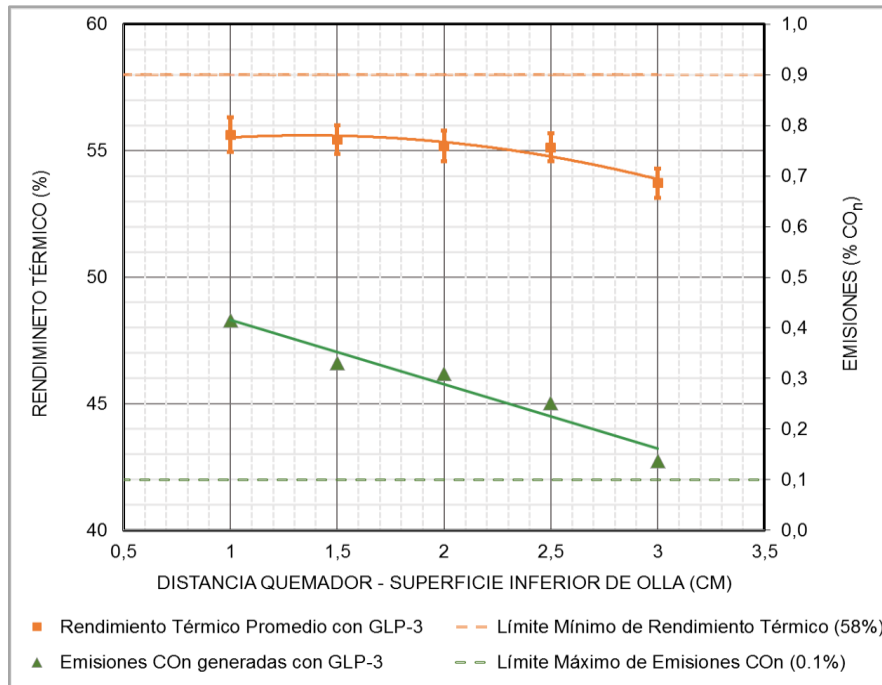


Figura 4.9. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura “h” quemador-olla en el mezclador GLP-3, para  $d=0,0$  cm

#### 2.1.4. Mezclador GLP-4

Según lo mostrado en la Figura 4.10, el mezclador GLP-4 presenta el punto más alto de rendimiento térmico (55,88%) al establecer una distancia “d” de 0,5 cm, aunque por debajo del límite mínimo establecido (58%).

Por otra parte, en la Figura 4.11 puede notarse con mayor claridad el efecto en la llama cuando se varía la distancia “d” entre el inyector y el mezclador, denotando un color más amarillento al acercar el inyector al mezclador, mientras que al alejarse ambos elementos la llama adquiere un color azulado y un comportamiento más estable. Si se complementa esta descripción con los resultados mostrados en la Figura 4.10 se puede comprobar que al acercar el inyector al mezclador se desarrolla una llama de color amarillento que genera mayor cantidad de porcentaje de emisiones de monóxido de carbono neutro  $(CO)_N$ , a pesar de posibilitar un mayor rendimiento térmico.

A su vez, si se mantiene la distancia “d” entre el inyector y el mezclador de 0,5 cm ( $d=0,5$  cm), pues es la que ofrece el mayor rendimiento térmico en este mezclador

según lo visto en la Figura 4.10, y se eleva la altura “h” entre la olla con agua y el quemador a 3 cm ( $h=3,0$  cm), se puede observar en la Figura 4.12 que el porcentaje de emisiones de monóxido de carbono supera aproximadamente al doble del máximo valor recomendado (0,1%), hecho que no sucede en los anteriores mezcladores.

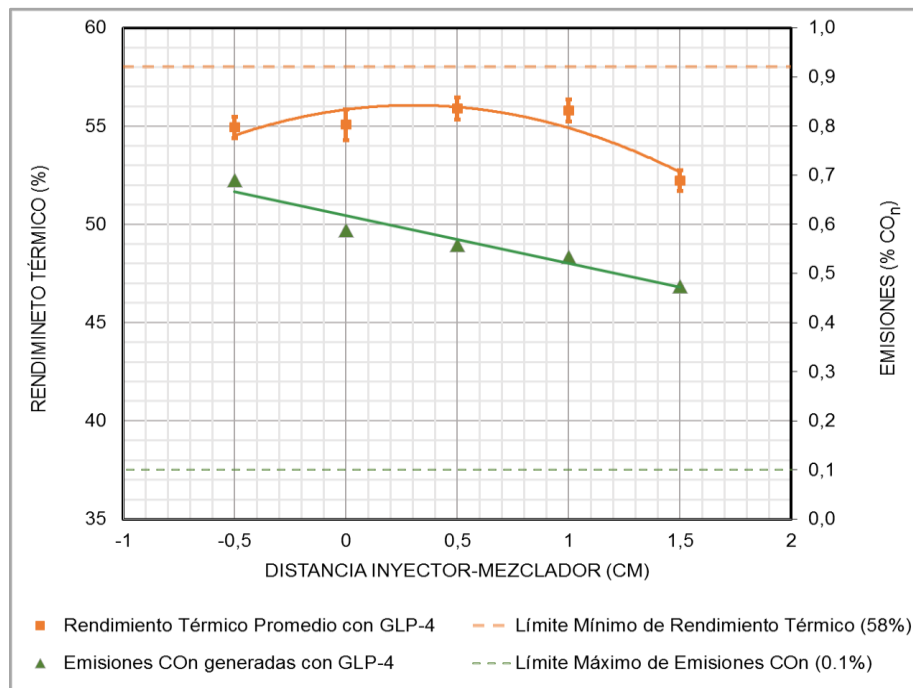


Figura 4.10. Rendimiento térmico y emisiones de (CO)<sub>N</sub> influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-4, para h= 1,0 cm



Figura 4.11. La llama en el mezclador GLP-4, para h=1,0 cm

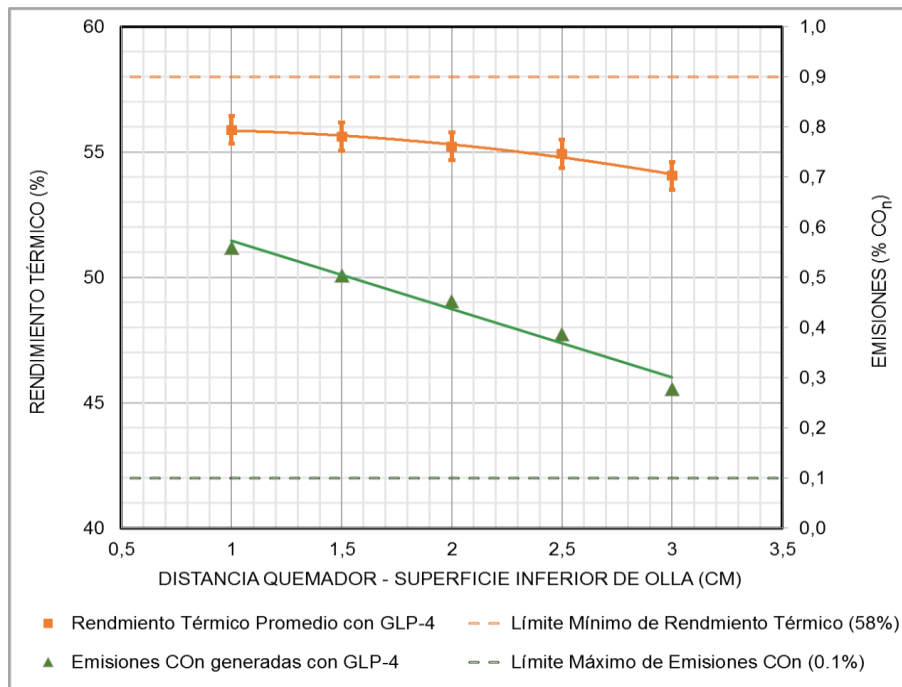


Figura 4.12. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-4, para  $d=0,5$  cm

### 2.1.5. Mezclador GLP-5

En la Figura 4.13 se puede observar que en el mezclador GLP-5 se obtiene el mayor nivel de rendimiento térmico cuando el inyector está a una distancia del mezclador de 0 cm ( $d=0,0$  cm), superando el mínimo valor requerido (58%) y lo obtenido con los anteriores mezcladores. Sin embargo, se sobrepasa el límite máximo del porcentaje de emisiones de monóxido de carbono neutro  $(CO)_N$ .

Es importante mencionar que al observar los valores de los rendimientos térmicos con sus respectivas incertidumbres totales, mostradas en las Tablas A.9 Y A.10 del Anexo A, se puede apreciar que también es posible obtener rendimientos por encima del 58%, establecido por la norma NCh927/1, al introducir el inyector en el mezclador a una distancia de 0,5 cm ( $d=-0,5$  cm) o 1 cm ( $d=-1,0$  cm), lo que representa un mayor rango de longitudes inyector-mezclador que pueden ser utilizadas por este mezclador, aspecto que no se tiene en los anteriores modelos usados para GLP.



En la Figura 4.14 se puede notar claramente que al tener el inyector a una distancia de 1,5 cm del mezclador ( $d=1,5$  cm) la llama adquiere un color más azulado a comparación de las demás fotografías mostradas en la misma imagen, lo que representa una mayor entrada de aire en la mezcla.

En la Figura 4.15 se puede observar que al elevar la altura “h” entre la olla y la hornilla hasta un valor de 3.0 cm ( $h=3,0$  cm), manteniendo la distancia inyector-mezclador con la que se obtiene mayor porcentaje de rendimiento térmico ( $d=0,0$  cm), el porcentaje de emisión de monóxido de carbono neutro se reduce a un nivel cercano a lo admitido, pero el rendimiento se reduce hasta estar por debajo de límite admisible.

El rendimiento térmico alcanzado con este mezclador es el más alto de entre los desarrollados para GLP, lo cual puede deberse a la ausencia de una sección divergente a la salida del mezclador que podría estar generando una reducción de velocidad del flujo de la mezcla, ya que al salir de la sección de entrada convergente la mezcla presenta un carácter subsónico, y la forma divergente desacelera fluidos con dicha característica.

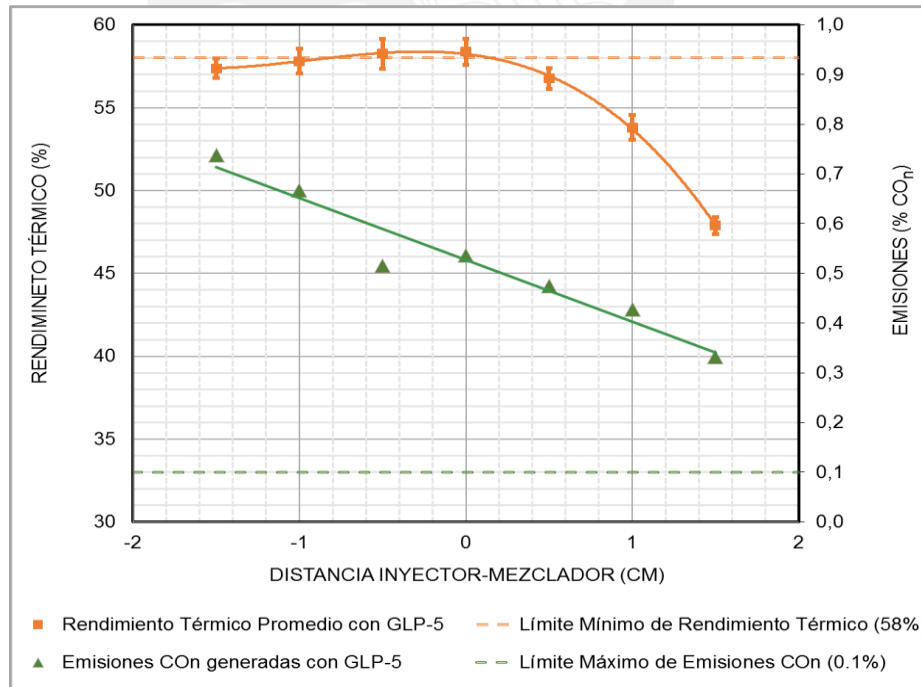


Figura 4.13. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-5, para  $h=1,0$  cm



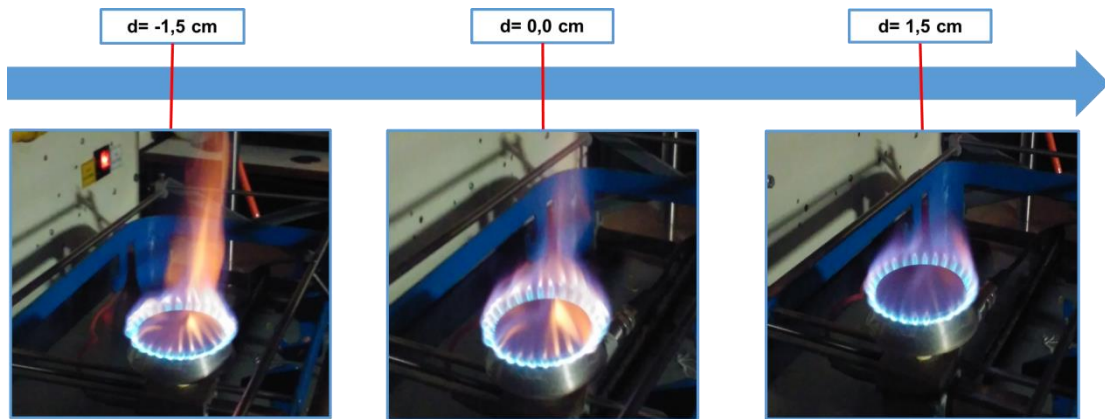


Figura 4.14. La llama en el mezclador GLP-5, para  $h=1,0$  cm

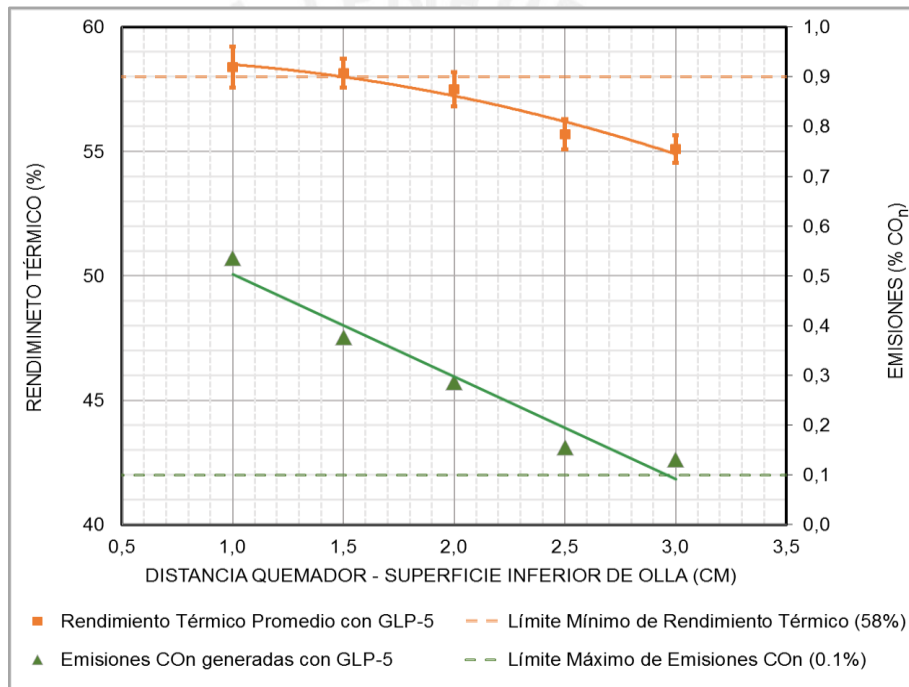


Figura 4.15. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GLP-5, para  $d= 0,0$  cm

### 2.1.6. Mezclador GLP-6

Según lo mostrado en la Figura 4.16, en el mezclador GLP-6 se obtiene el mayor rendimiento térmico cuando el inyector está a una distancia de 0.0 cm con respecto al mezclador ( $d=0.0$  cm), superando el valor de rendimiento térmico recomendado (58 %) y el máximo valor promedio obtenido con el mezclador GLP-3, con el cual este modelo

solo difiere en el ángulo de entrada de la sección convergente del mezclador (ver Tabla 2.3).

Por otra parte, si se compara las llamas formadas al usar este mezclador (Figura 4.17), con las correspondientes al modelo GLP-3 en la Figura 4.8, se ve que las primeras poseen un color más amarillento, lo cual denota una mayor emisión de monóxido de carbono neutro.

En la Figura 4.18, se observa que solo al elevar la altura entre el quemador y la superficie inferior de la olla a 2.5 cm ( $h = 2.5$  cm), conservando la distancia “d” de 0 cm, se obtiene una reducción significativa en el rendimiento térmico, tal como sucede con el modelo GLP-3. Mientras que en lo que respecta a la emisión de  $(CO)_N$ , los valores conseguidos aún están por encima del límite establecido.

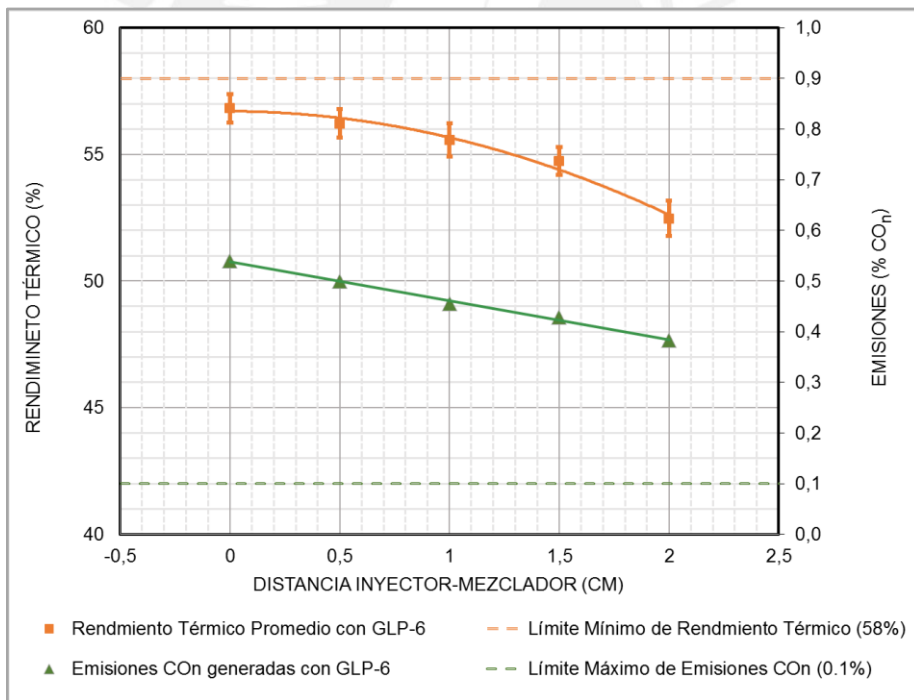


Figura 4.16. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GLP-6

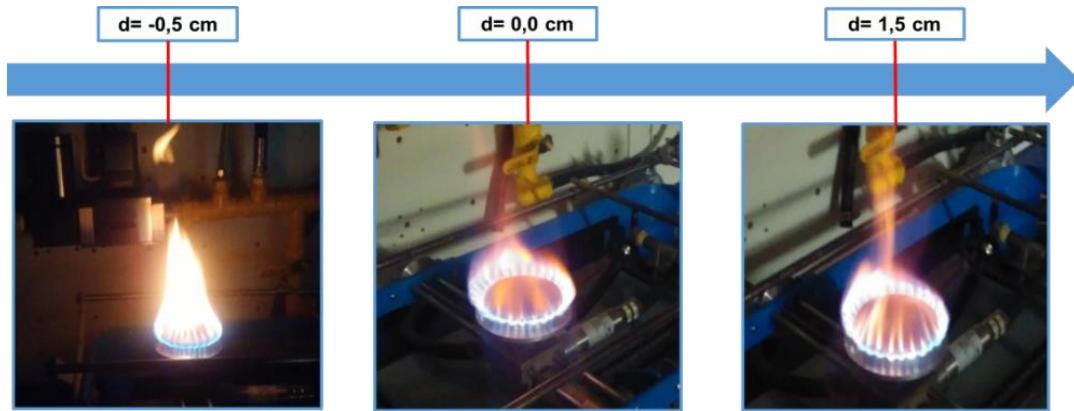


Figura 4.17. La llama en el mezclador GLP-6, para  $h=1,0$  cm

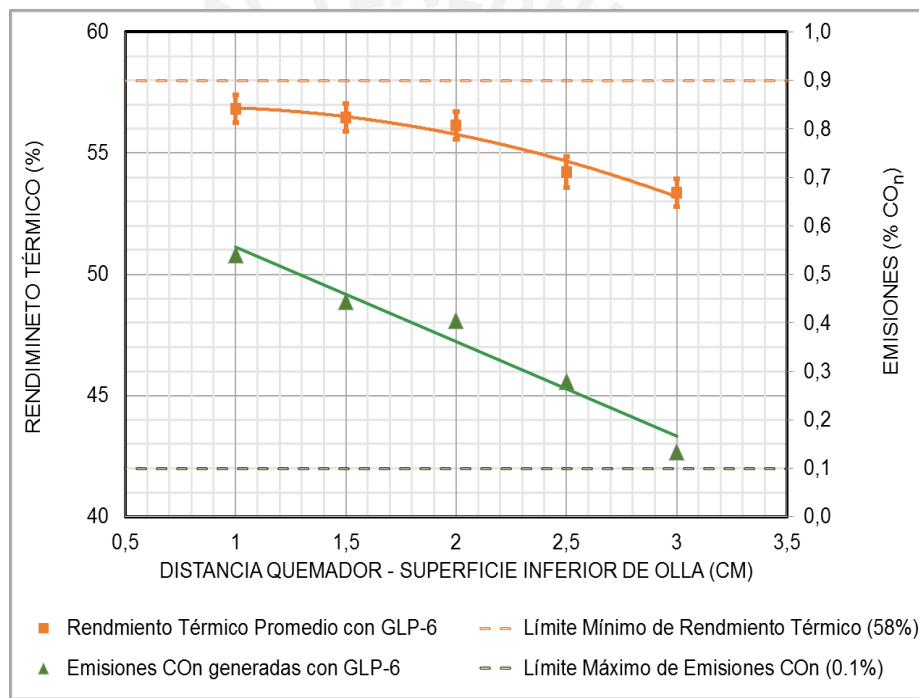


Figura 4.18. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura "h" quemador-olla en mezclador GLP-6

## 2.2. Evaluación de los mezcladores con gas natural

### 2.2.1. Mezclador GN-1

Según los resultados mostrados en la Figura 4.19, el mezclador obtiene su mayor nivel de rendimiento térmico cuando la distancia entre el inyector y el mezclador es de 0 cm ( $d=0,0$  cm), superando el mínimo valor establecido (58%). Sin embargo, los porcentajes de emisiones de  $(CO)_N$  se encuentran por encima de lo recomendado.

En la Figura 4.20 puede verse que la llama obtiene una tonalidad naranja cuando el inyector está introducido 1,0 cm en el mezclador ( $d=-1,0$  cm), lo que representa un aumento de emisiones de  $(CO)_N$ , tal como se puede ver reflejado en la Figura 4.19.

Por su parte, en la Figura 4.21 se muestra la variación del rendimiento y las emisiones de  $(CO)_N$  al aumentar la altura "h" de 1,0 cm a 3,0 cm, mientras se mantiene la distancia óptima de 0 cm entre el inyector y mezclador ( $d= 0,0$  cm), con lo cual el porcentaje de  $(CO)_N$  se reduce a un nivel cercano a lo recomendado al elevar la altura, pero el rendimiento cae por debajo del límite de 58% recomendado.

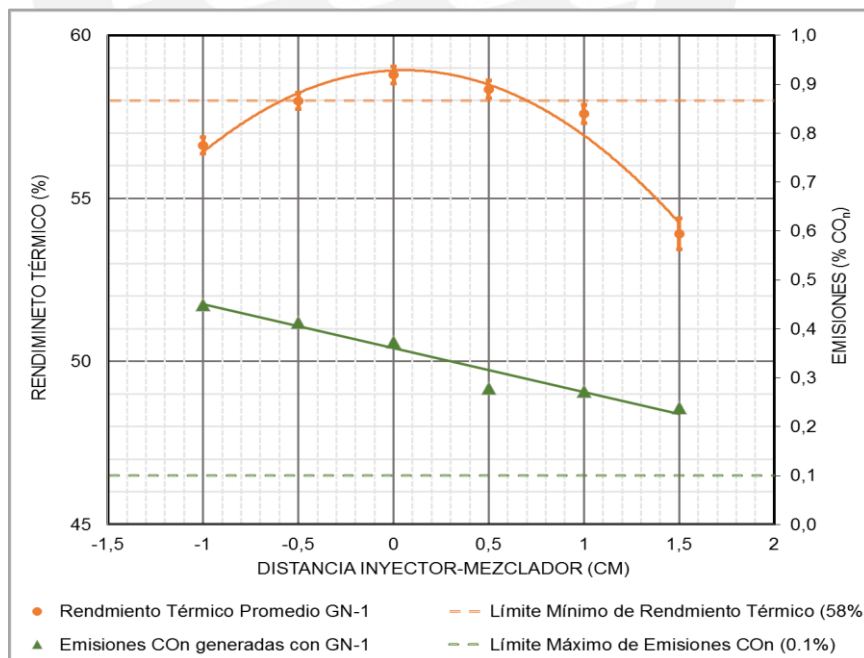


Figura 4.19. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la distancia "d" mezclador-inyector en el mezclador GN-1, para  $h= 1,0$  cm

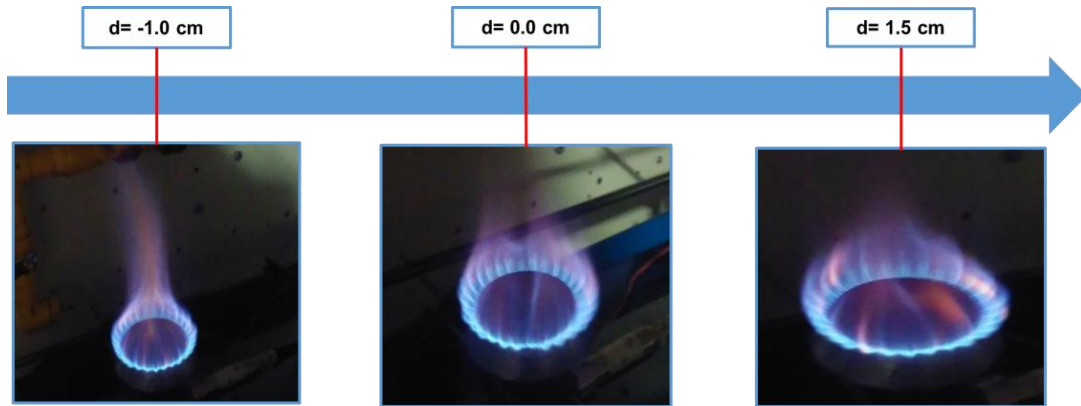


Figura 4.20. La llama en el mezclador GN-1, para  $h=1,0$  cm

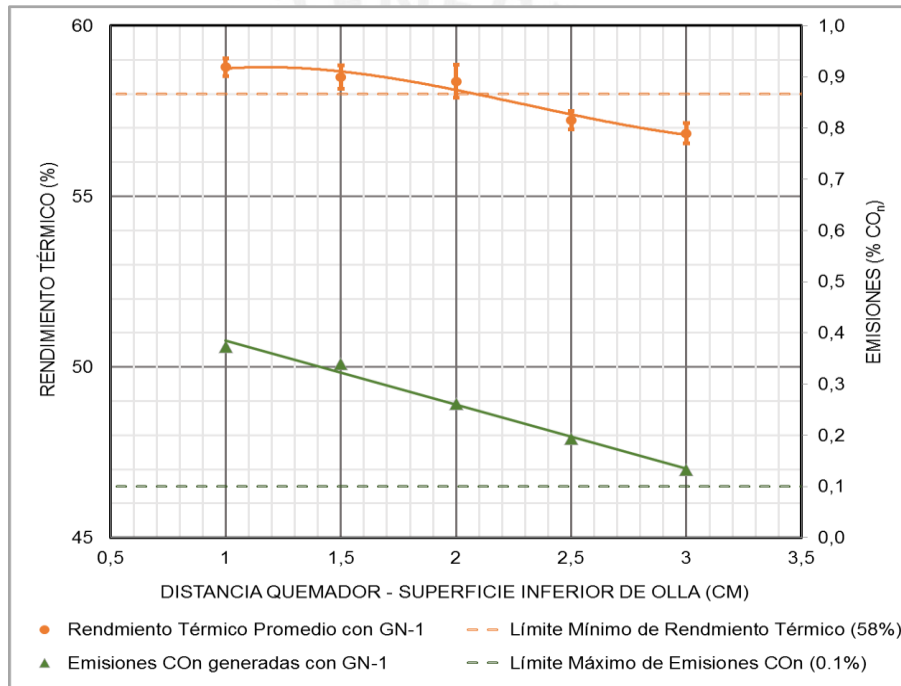


Figura 4.21. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura “h” quemador-olla en mezclador GN-1, para  $d=0,0$  cm

### 2.2.2. Mezclador GN-2

Según lo mostrado en la Figura 4.22, en el mezclador GN-2 se obtiene el rendimiento térmico más alto cuando la distancia entre el inyector y el mezclador es de 0,5 cm ( $d=0,5$  cm), superando a lo alcanzado por el modelo GN-1, aunque aún se mantiene el porcentaje de  $(CO)_N$  por encima del límite máximo admitido.

En la Figura 4.23 se puede observar que no existe una diferencia notoria en la forma de llama al modificar la distancia “d” entre el inyector y el mezclador de 0,5 cm a 1,5 cm; mientras que al introducir el inyector 1,0 cm dentro del mezclador ( $d = -1,0$  cm) se puede ver puntas amarillas más elevadas en la llama desarrollada, lo que evidencia un mayor porcentaje de emisiones de  $(CO)_N$ , corroborado con los resultados de la Figura 4.22, en donde el porcentaje de este tipo de misiones no varía de manera notable cuando la distancia “d” está en el rango de 0 cm a 1,5 cm, adquiriendo en  $d = -1,0$  cm el valor más alto (0,4546 %); según lo mostrado en la Tabla B.3 del ANEXO B.

En la Figura 4.24 se muestra que manteniendo la distancia “d” entre el inyector y mezclador de 0,5 cm ( $d = 0,5$  cm), y elevando la altura entre el quemador y la superficie inferior del recipiente con agua a 3 cm ( $h = 3$  cm) la formación de monóxido de carbono neutro se reduce hasta el valor recomendado; sin embargo, el rendimiento térmico decrece hasta cerca de 56 % aproximadamente.

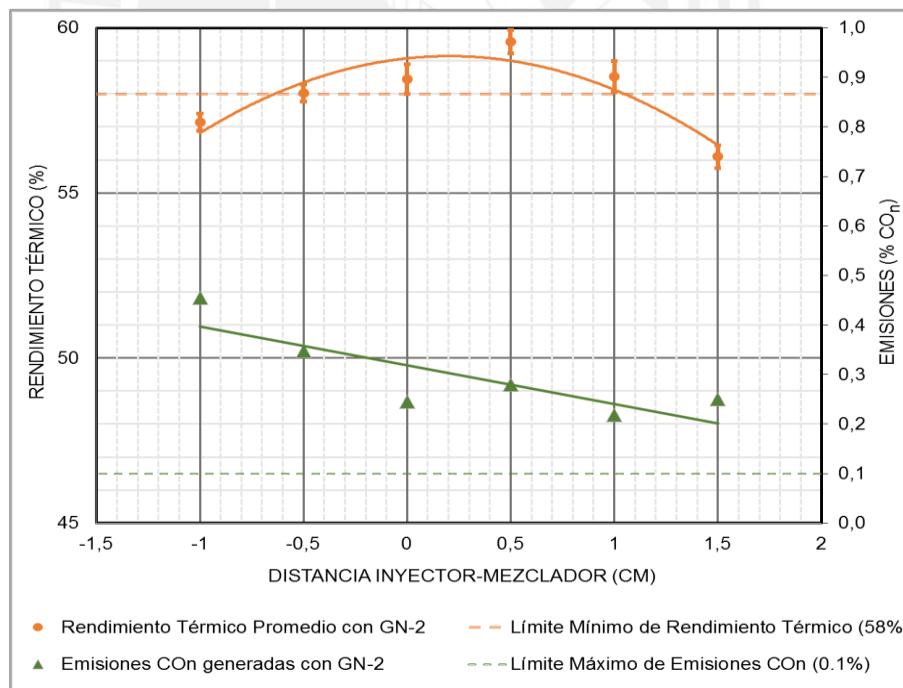


Figura 4.22. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-2, para  $h = 1,0$  cm

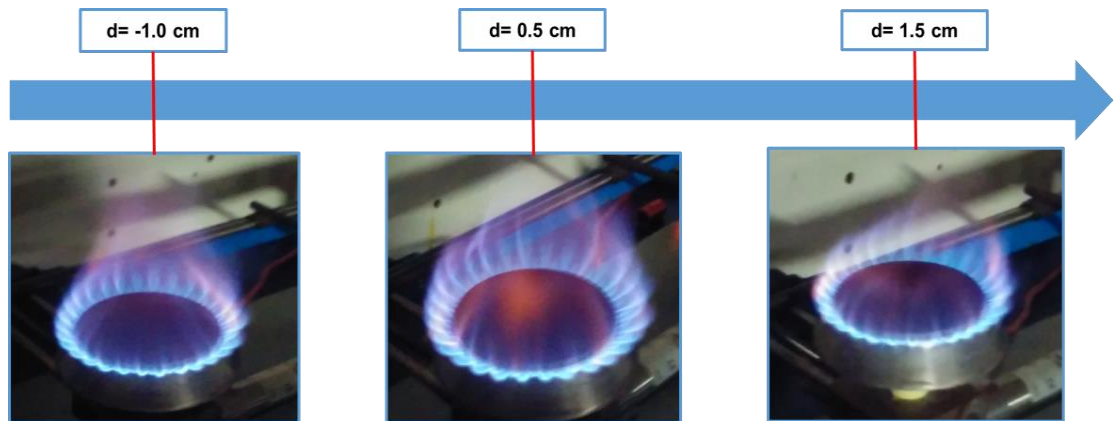


Figura 4.23. La llama en el mezclador GN-2, para  $h=1,0$  cm

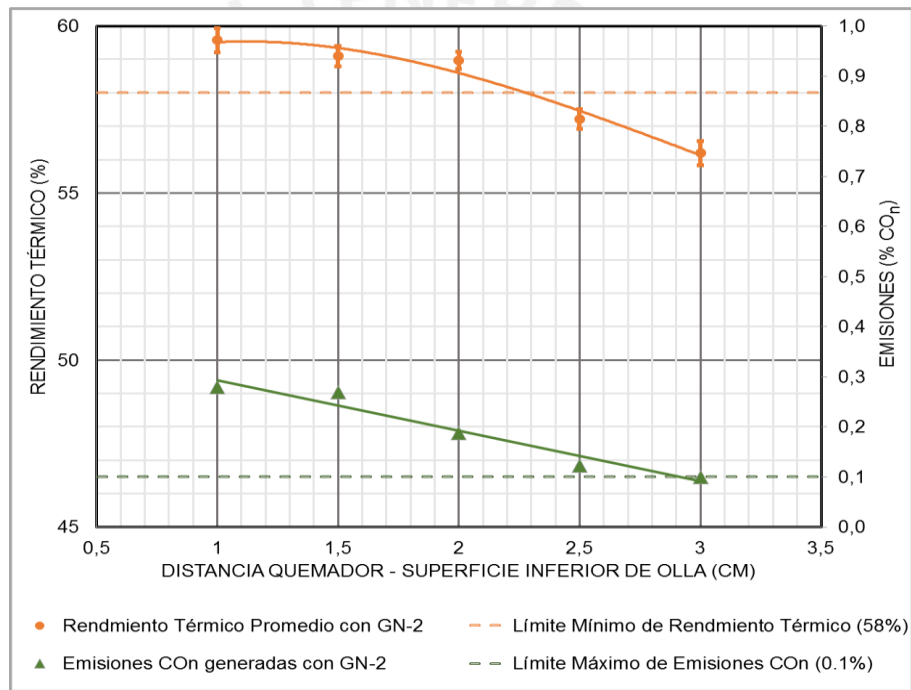


Figura 4.24. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura “ $h$ ” quemador-olla en mezclador GN-2, para  $d=0,5$  cm

### 2.2.3. Mezclador GN-3

Según lo mostrado en la Figura 4.25, en el mezclador GN-3 el rendimiento más óptimo se obtiene cuando el inyector está introducido 0,5 cm en el mezclador ( $d=-0,5$  cm), superando al límite establecido (58%) y similar a lo máximo obtenido con el mezclador GN-1 (58,79% según Tabla B.1 del ANEXO B). Mientras que los porcentajes de emisiones de  $(CO)_N$  están por encima de lo medido en modelo GN-1, denotando que

un mezclador de estas dimensiones no permite una mezcla aire-gas combustible apropiada.

En la imagen 4.26 se puede observar que las llamas desarrolladas poseen puntas amarillas más notorias que las mostradas por los mezcladores GN-1 (Figura 4.20) y GN-2 (Figura 4.23). Esto significa que con el mezclador GN-3 se generarán mayores emisiones a pesar de tener rendimientos similares a los mezcladores anteriores, tal como se puede comprobar los resultados en la Figura 4.27 y en la Tabla B.5 del Anexo B.

En la Figura 4.27 se muestra que a partir de una altura de 2 cm entre la olla con agua y el quemador ( $h = 2,0$  cm), manteniendo la distancia inyector-mezclador más óptima según la Figura 4.25 ( $d = -0,5$  cm), el rendimiento térmico comienza a decrecer por debajo del porcentaje mínimo de 58%, mientras que el porcentaje de emisiones de carbono neutro ( $\text{CO}_N$ ) aún está por encima del límite establecido.

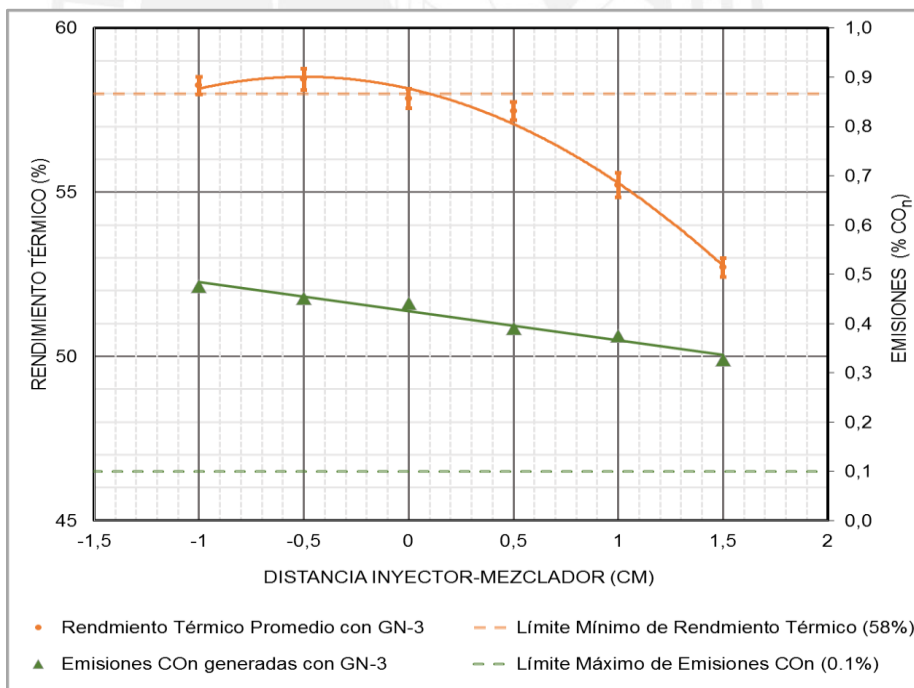


Figura 4.25. Rendimiento térmico y emisiones de  $(\text{CO})_N$  influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-3, para  $h = 1,0$  cm



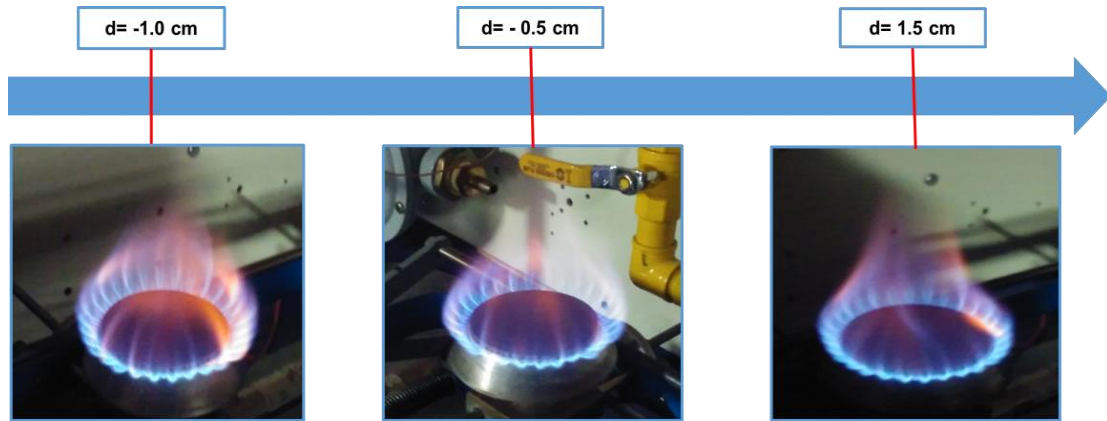


Figura 4.26. La llama en el mezclador GN-3, para  $h = 1$  cm

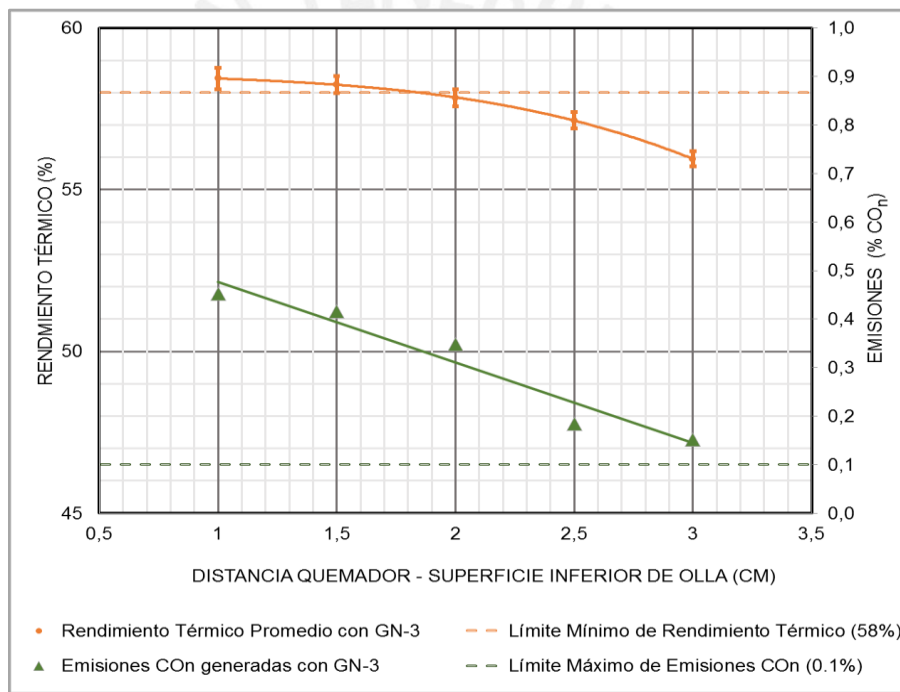


Figura 4.27. Rendimiento térmico y emisiones de  $(CO)_N$  influenciados por la altura "h" quemador-olla en mezclador GN-3, para  $d = -0,5$  cm

#### 2.2.4. Mezclador GN-4

Según los resultados mostrados en la Figura 4.28, el mezclador GN-4 presenta el porcentaje de rendimiento térmico más alto cuando el inyector está a una distancia de 0,5 cm del quemador ( $d = 0,5$  cm), superando el mínimo valor requerido (58%) y a los máximos valores alcanzados por los mezcladores GN-1 y GN-3. Mientras que el

porcentaje de emisiones de monóxido de carbono ( $\text{CO}_N$ ) se mantiene por encima de lo obtenido en los anteriores mezcladores, lo cual puede verificarse con las llamas mostradas en la Figura 4.29, las que adquieren un forma similar a lo visto en los mezcladores de gas licuado de petróleo (GLP), adquiriendo puntas amarillas más visibles que las llamas desarrolladas con mezcladores GN-1, GN-2 y GN-3.

En la Figura 4.30 se puede observar que con este mezclador se puede alcanzar al nivel de porcentaje de emisión de monóxido de carbono neutro ( $\text{CO}_N$ ) admisible al alejar la olla del quemador hasta tener 3 cm de altura entre el recipiente con agua y el quemador ( $h= 3,0$  cm), conservando la distancia inyector-mezclador “d” más recomendable según la Figura 4.28 ( $d= 0,5$  cm); sin embargo, el rendimiento térmico cae a un valor por debajo de lo recomendado (56,63% según lo mostrado en la Tabla B.8 del ANEXO B).

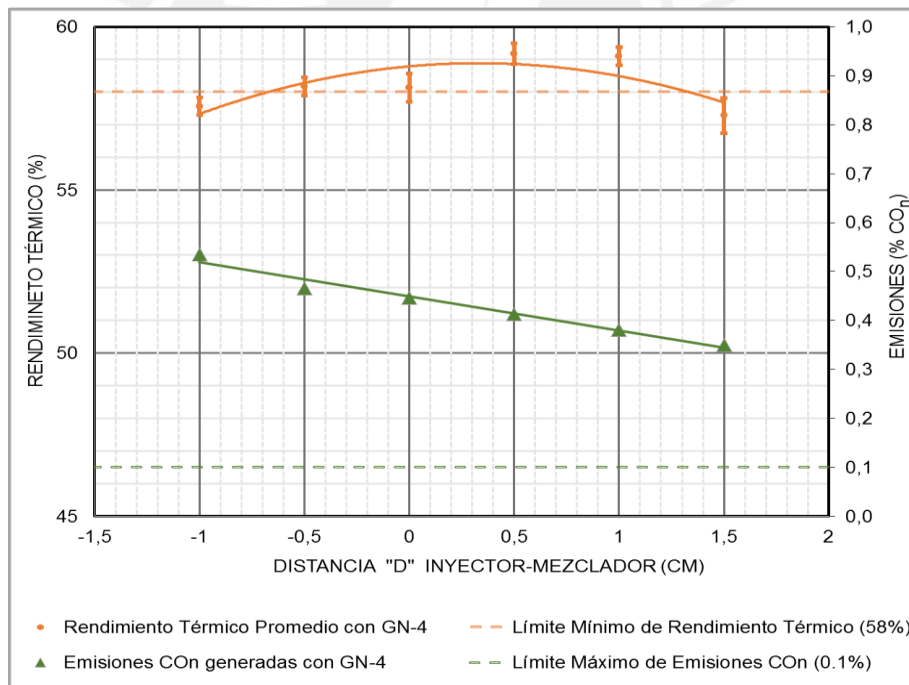


Figura 4.28. Rendimiento térmico y emisiones de ( $\text{CO}_N$ ) influenciados por la distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-4, para  $h= 1,0$  cm

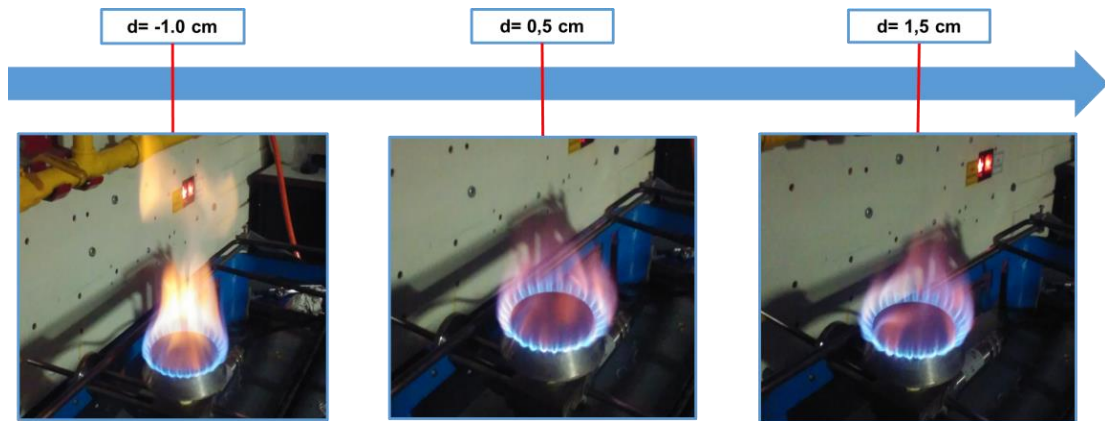


Figura 4.29. La llama en el mezclador GN-4, para  $h= 1,0$  cm

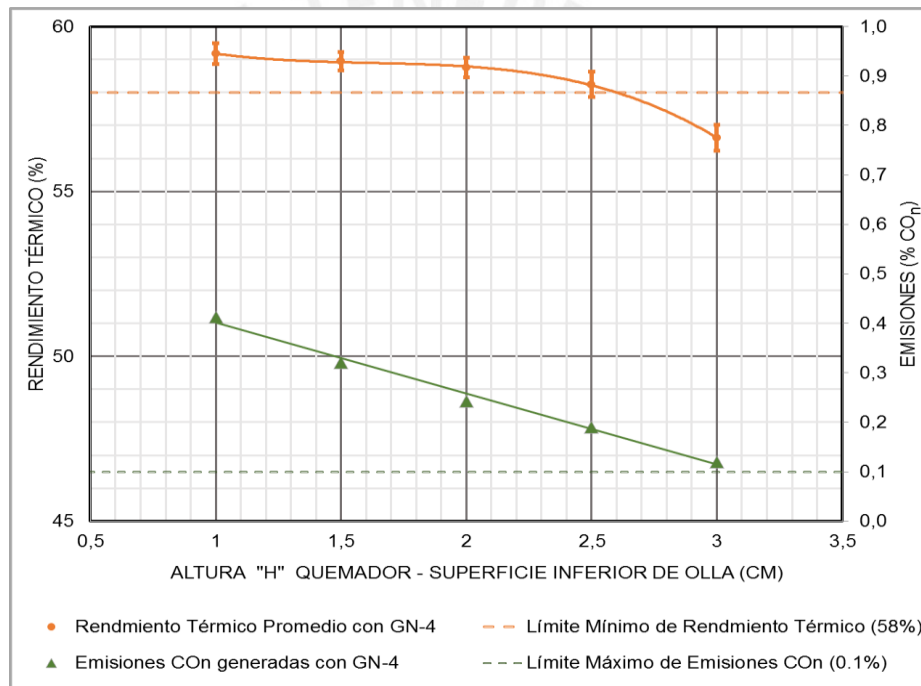


Figura 4.30. Gráfico de Rendimiento y emisiones de  $(CO)_N$  debido a altura "h" quemador-olla en mezclador GN-4, para  $d=0,5$  cm

### 2.2.5. Mezclador GN-5

Según lo mostrado en la Figura 4.31, en el mezclador GN-5 se puede obtener el punto más alto de rendimiento térmico cuando la distancia entre el inyector y el mezclador es de 0 cm ( $d= 0,0$  cm), superando el límite mínimo establecido (58%). Además, se registra un porcentaje de emisión de monóxido de carbono neutro  $(CO)_N$  por encima del valor máximo admitido (0,1%), lo cual puede reducirse al nivel requerido si se eleva

la altura “h” entre la olla y la hornilla a 3 cm ( $h= 3,0$  cm), tal como se puede ver en la Figura 4.33, aunque generando una reducción en el rendimiento térmico hasta un porcentaje de 58,06%, con una incertidumbre total de  $\pm 0,42\%$  (ver Tabla B.10 en Anexo B), lo que sugiere la posibilidad de operar dentro de los límites de rendimiento y porcentaje de  $(CO)_N$  si se trabaja bajo estas condiciones ( $d=0,0$  cm y  $h=3,0$  cm), evento que no se había presentado en ninguno de los otros mezcladores analizados.

Con respecto a las llamas desarrolladas en la Figura 4.32, estas no muestran mucha variedad a pesar de variar la distancia entre el inyector y el mezclador, pero se puede observar una presencia de puntas amarillas en las todas la fotografías de llamas; lo cual, acompañado de la información mostrada en la Figura 4.33, se puede determinar que hay un mayor porcentaje de emisión de  $(CO)_N$  con respecto a lo generado con los mezcladores GN-1, GN-2 y GN-3.

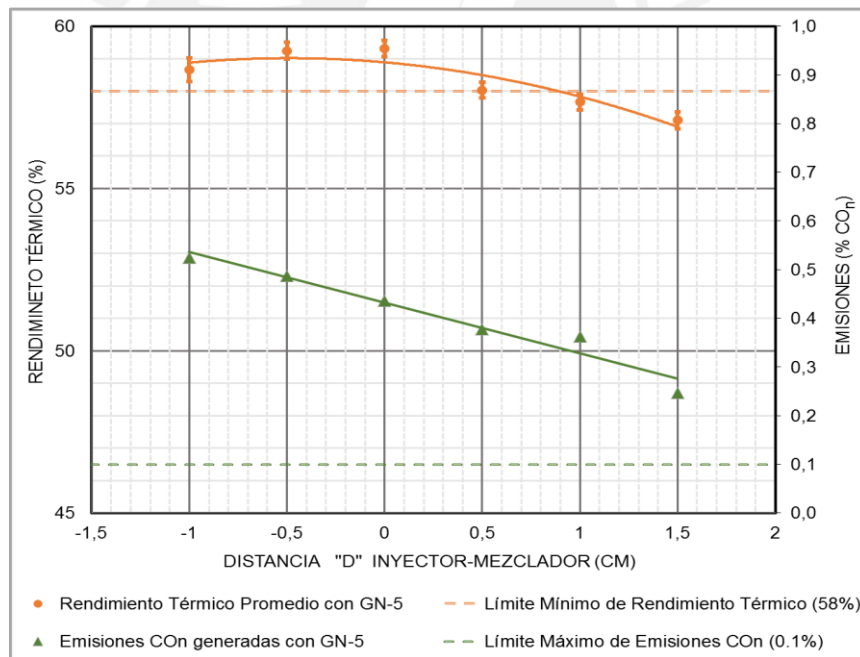


Figura 4.31. Gráfico de Rendimiento y emisiones de  $(CO)_N$  debido a distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-5, para  $h= 1,0$  cm

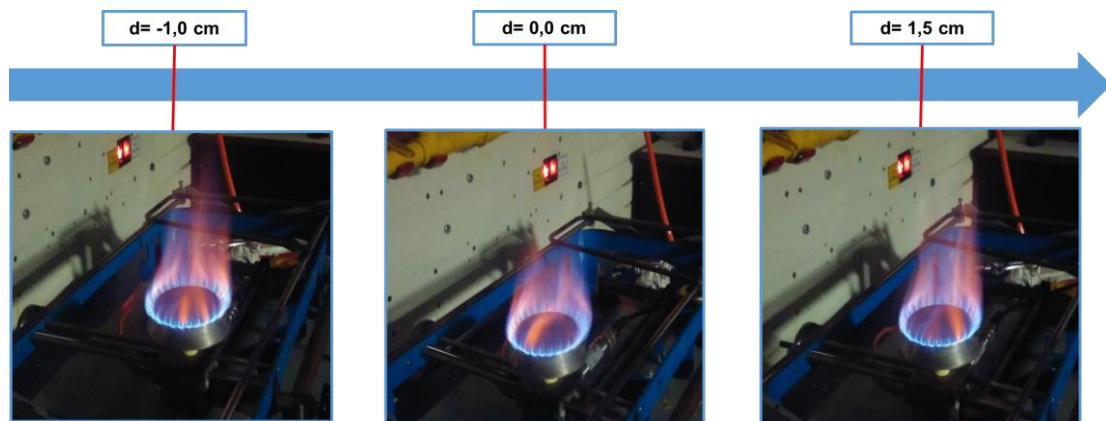


Figura 4.32. La llama en el mezclador GN-5, para  $h=1,0$  cm

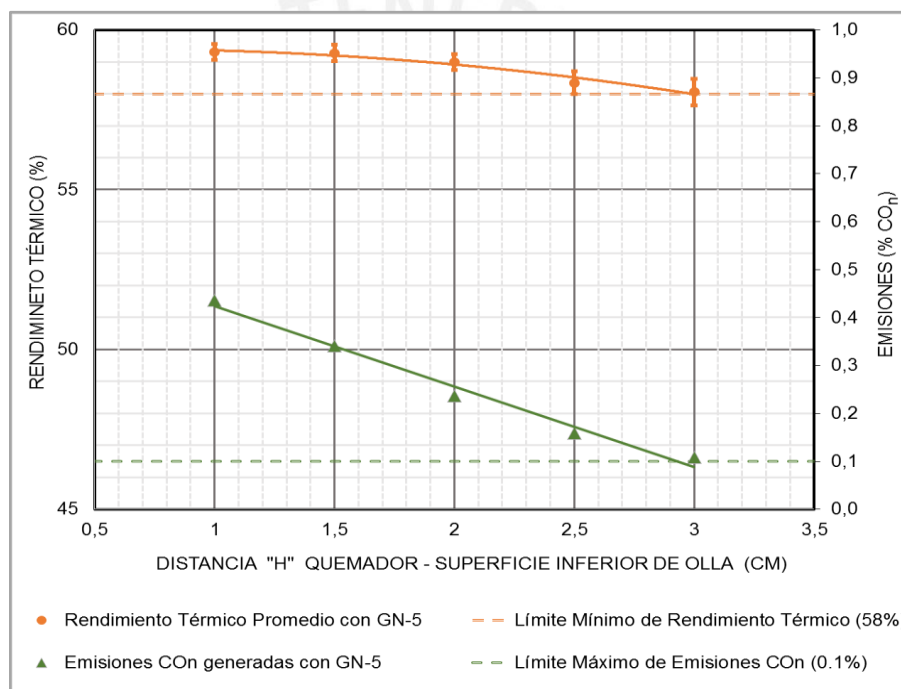


Figura 4.33. Gráfico de Rendimiento y emisiones de  $(CO)_N$  debido a altura "h" quemador-olla en mezclador GN-5, para  $d=0,0$  cm

## 2.2.6. Mezclador GN-6

Para el mezclador GN-6, se muestra en la Figura 4.34 que el rendimiento térmico más alto se alcanza cuando el inyector está introducido 1 cm dentro del mezclador ( $d=-1,0$  cm), aunque con un resultado por debajo de los máximos valores obtenidos con los otros modelos de mezcladores analizados para gas natural (GN-1, GN-2, GN-3 y GN-5); lo cual no sucede con los porcentajes de emisiones de monóxido de carbono

neutro registrados, ya que se continúa con valores similares a lo obtenido con el mezclador GN-3 ( ver Tablas B.5 Y B.11 del Anexo B).

En la Figura 4.35 se muestra que en donde se consigue mayor rendimiento térmico la llama tiene puntas amarillas notorias, demostrando que la mezcla desarrollada en este modelo no es adecuada pues, como se explicó en el capítulo 1, esto demuestra una incorrecta combustión de hidrocarburos que forman parte del gas combustible.

En la Figura 4.36 se puede confirmar que, al igual que con el mezclador GN-3, al aumentar la altura “h” entre la olla con agua y el quemador a un valor de 2,0 cm (h= 2,0 cm) el rendimiento térmico empieza a decrecer a niveles por debajo del 58%, a pesar de mantener la distancia inyector-mezclador más óptima según los resultados mostrados en la Figura 4.34 (d=-1,0 cm).

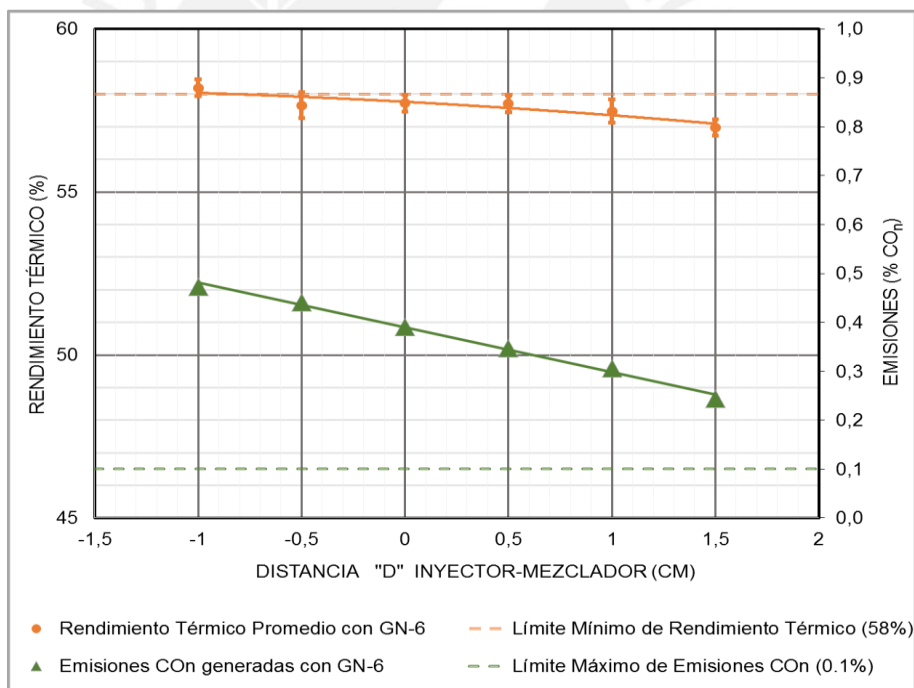


Figura 4.34. Gráfico de Rendimiento y emisiones de CO<sub>n</sub> debido a distancia “d” mezclador-inyector en el mezclador GN-6, para h= 1,0 cm

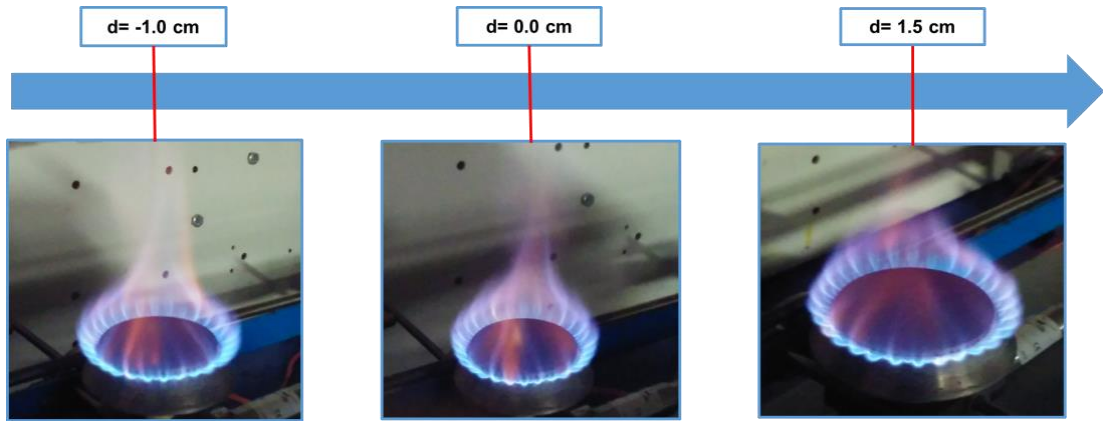


Figura 4.35. La llama en el mezclador GN-6, para  $h = 1,0$  cm

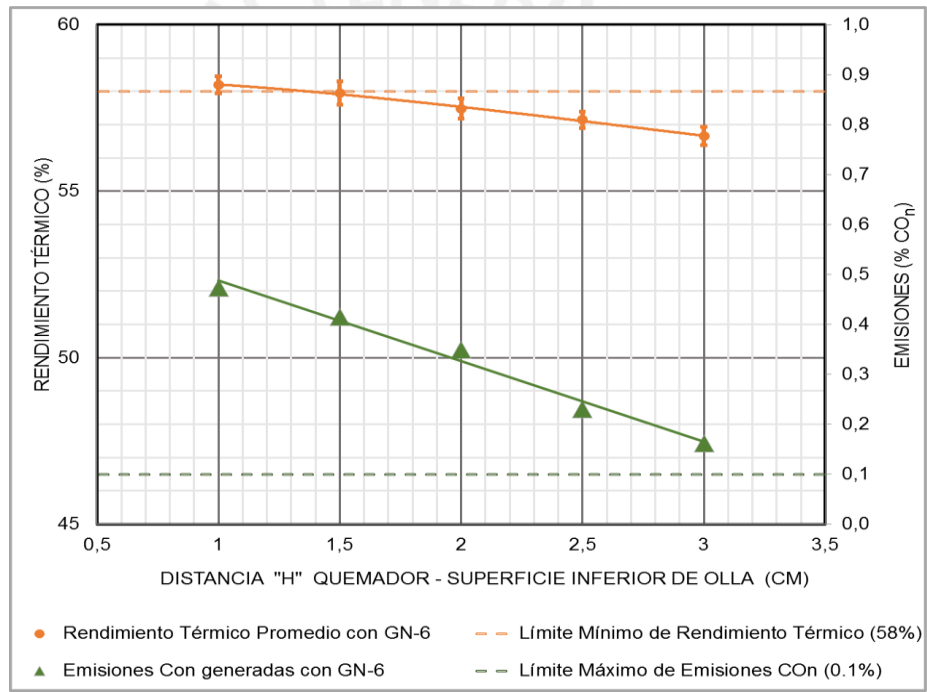


Figura 4.36. Gráfico de Rendimiento y emisiones de CO<sub>n</sub> debido a altura "h" quemador-olla en mezclador GN-6, para  $d = 0,0$  cm

### 2.3. Comparación de Resultados de Rendimiento Térmico

En el gráfico de la Figura 4.37 se puede constatar que, en lo que respecta a modelos de mezcladores a GLP, solo con el mezclador GLP-5 se puede obtener un rendimiento térmico mayor al 58% requerido por la norma NCh927/1 (Instituto de Normalización Chilena, 2008), aunque al alejar el inyector del mezclador a una distancia mayor de 1 cm ( $d=1$  cm), el rendimiento térmico alcanzado con este modelo se reduce a niveles por debajo de todos los demás.

Por su parte, el mezclador GLP-2 permite desarrollar un porcentaje de rendimiento térmico, en promedio, por encima a los otros a partir de una separación de 0,5 cm de distancia entre el inyector y el mezclador ( $d=0,5$  cm); aunque sin superar el rendimiento térmico de 58% requerido.

Mientras que el mezclador GLP-3 es el que, en promedio, muestra niveles más bajos de rendimiento térmico en todas las distancias “d” analizadas.

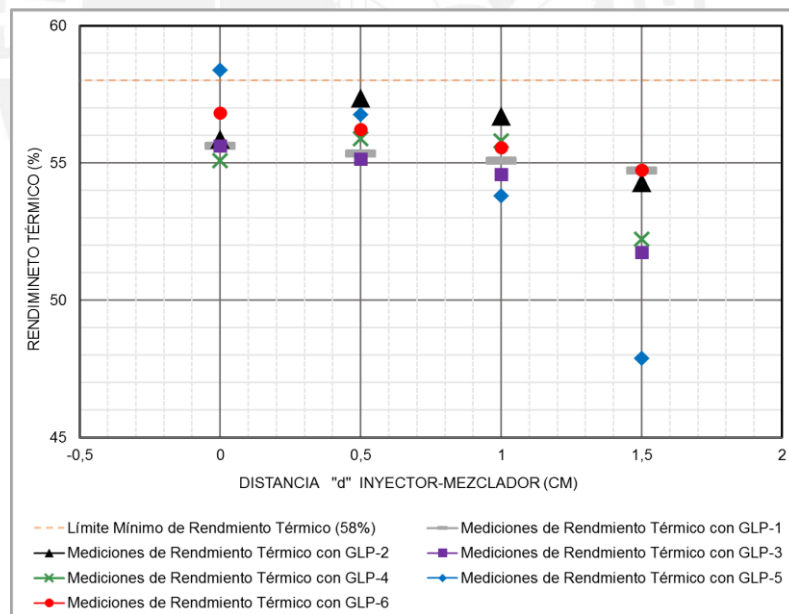


Figura 4.37. Gráfico comparativo de Mediciones de Rendimiento Térmico en mezcladores de GLP, para  $h = 1,0$  cm

En la Figura 4.38 se puede observar que el modelo GN-5 presenta un mayor rendimiento térmico a comparación de los demás mezcladores a gas natural; pero, al igual que sucede con los modelos a GLP, al distanciar el inyector de este mezclador, el



rendimiento se reduce a un porcentaje por debajo de los demás. Por lo tanto, queda demostrado experimentalmente que el mejor rendimiento con este mezclador se puede obtener sólo cuando el inyector esté introducido en el mezclador ( $d < 0,0$  cm).

Cuando se comparan los resultados en circunstancias donde el inyector este alejado del mezclador ( $d > 0,0$  cm), los modelos GN-2 y GN-4 permiten desarrollar mayores niveles de rendimiento, superando el límite mínimo establecido por la norma NCh927/1 (Instituto de Normalización Chilena, 2008). Sin embargo, a una distancia de 1,5 cm entre el inyector y el mezclador, ninguno de los mezcladores puede superar el valor de 58%.

Con el modelo GLP-3 se obtiene los valores de rendimiento térmico más bajos dentro del grupo de mezcladores de gas natural, solo alcanzando niveles dentro de lo admisible cuando el inyector esta introducido 1 ó 0,5 centímetros dentro del mezclador.

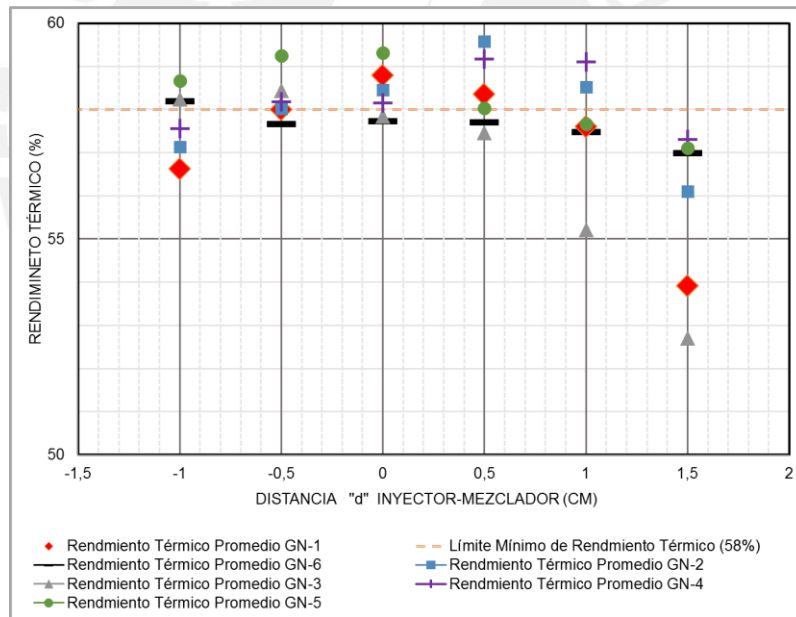


Figura 4.38. Gráfico comparativo de Mediciones de Rendimiento Térmico en mezcladores de gas natural, para  $h = 1,0$  cm

#### 2.4. Comparación de Resultados de Porcentaje de Emisiones de $CO_n$

En la Figura 4.39 se puede observar que con ninguno de los mezcladores diseñados para gas licuado de petróleo se pudo registrar porcentajes de emisiones de monóxido

de carbono neutro menores al límite máximo de 0,1% (Instituto de Normalización Chilena, 2008). Incluso al aumentar la distancia entre el quemador y la superficie inferior de la olla con agua hasta 3 cm ( $h = 3$  cm) las emisiones aún continúan por encima del valor requerido, tal como se muestra en las Figuras 4.3, 4.6, 4.9, 4.12, 4.15 y 4.18; siendo los resultados más cercanos los porcentajes obtenidos por el mezclador GLP-5 (ver Figura 4.15 y Tabla A.10 del ANEXO A) y el mezclador GLP-6 (ver Figura 4.18 y Tabla A.12 del ANEXO A), los cuales son de 0,1310 y 0,1351 respectivamente.

Asimismo, se puede observar que el mezclador GLP-3 ofrece el menor porcentaje de emisión de  $CO_n$  en todas las distancias inyector-mezclador analizadas, siendo el más bajo el porcentaje de 0,2137% (ver Tabla A.5 en ANEXO A), el cual es alcanzado a una distancia "d" entre el inyector y el mezclador de 1,5 cm ( $d = 1,5$  cm), mientras que la altura "h" entre el quemador y la olla es de 1 cm ( $h = 1,0$  cm).

Por su parte, el mezclador GLP-2 es el que genera el mayor porcentaje de emisión en todas las circunstancias estudiadas, generando como porcentaje más alto el valor de 0,6812% (ver Tabla A.4 en ANEXO A), si se mantiene al inyector junto a la entrada del mezclador, de modo que la distancia "d" sea de 0 cm y la altura "h" de 1 cm ( $h = 1,0$  cm) inicial entre el quemador y la olla con agua.

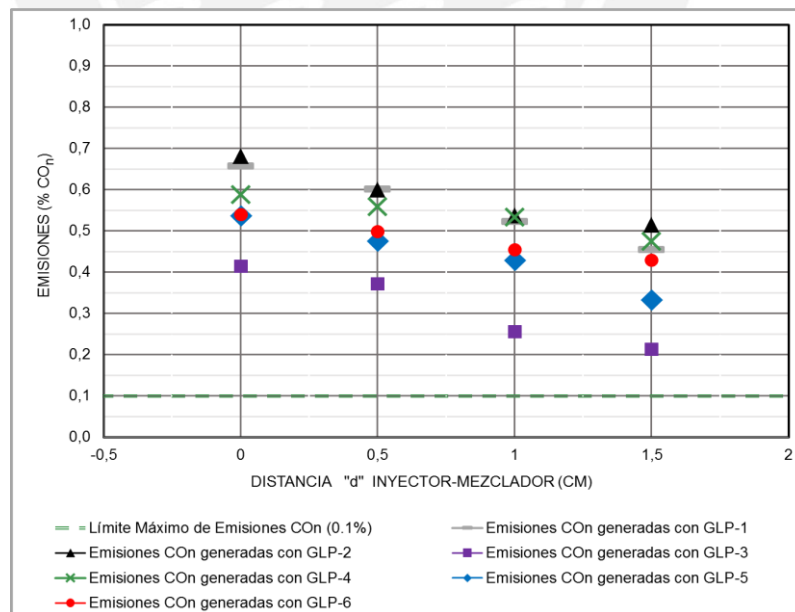


Figura 4.39. Gráfico comparativo de Porcentaje de Emisión de  $(CO)_N$  en mezcladores de GLP, para  $h = 1,0$  cm

En la Figura 4.40 se puede comprobar que para todos los mezcladores de gas natural, si se mantiene una distancia “d” inyector-mezclador como las mostradas en la figura mencionada, el porcentaje de emisión de carbono neutro será mayor al límite requerido por la norma técnica chilena NCh927/1 (0,1%). Sin embargo, se han encontrado circunstancias en las que se obtienen resultados cercanos al porcentaje de emisión de CO<sub>n</sub> de 0,1%; como lo obtenido por los mezcladores GN-2 (ver Figura 4.24 y Tabla B.4 del ANEXO B) y GN-5 (ver Figura 4.33 y Tabla B.10 del ANEXO B), los cuales, utilizando una altura “h” quemador-olla de 3 cm (h= 3,0 cm), mostraron resultados de 0,1006% y 0,1083% respectivamente.

Además, el mezclador GN-2 ofrece un menor porcentaje de emisiones en la mayoría de las distancias entre el inyector y el mezclador analizadas. Siendo la más baja la obtenida a una distancia “d” inyector-mezclador de 1 cm (d= 1,0 cm), con un valor de 0,2190%.

Por otra parte, el mezclador GN-4 ha mostrado mayores porcentajes de emisión en la mayoría de las distancias “d” estudiadas. Mostrando su valor más alto cuando el inyector está introducido 1 cm dentro del inyector (d= -1,0 cm), tal como se muestra en la Figura 4.28, con un porcentaje de 0,5355 %.

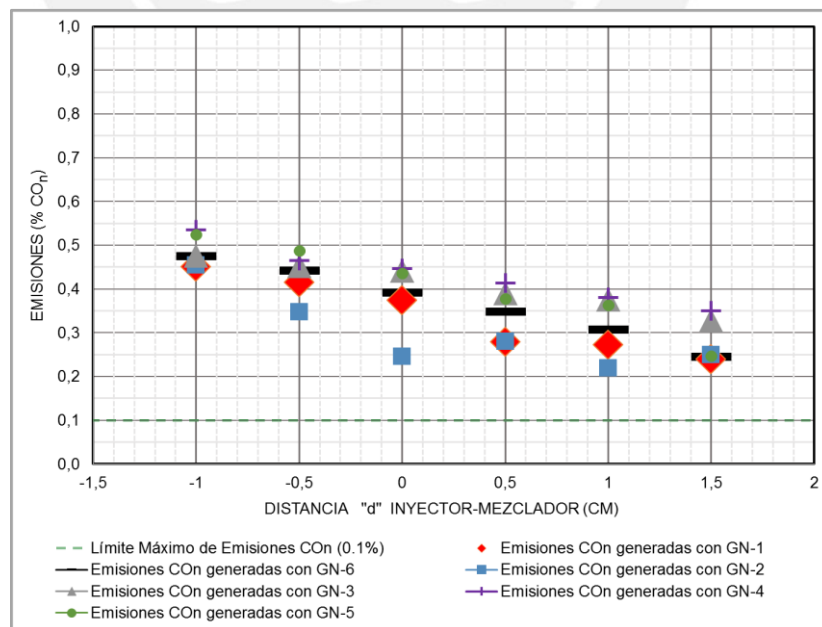


Figura 4.40. Gráfico comparativo de Porcentaje de Emisión de (CO)<sub>N</sub> en mezcladores de gas natural, para h = 1,0 cm

## CONCLUSIONES

El presente trabajo estudió las variables que se deben establecer para el dimensionamiento del mezclador, permitiendo reconocer, tras el desarrollo de los ensayos, cuáles fueron los efectos producidos por las diferencias en las dimensiones en sus secciones y la variación de las distancias entre el inyector con el mezclador, así como la del quemador con el recipiente de agua; generando una fuente de datos que podría ser usada para investigaciones en el futuro.

En primera instancia, comparando los resultados obtenidos de los mezcladores GN-1 y GLP-1, obtenidos mediante lo establecido por el autor Howard Neil Jones (Jones, 1989), con los otros mezcladores GN-4 Y GLP-4, que fueron el resultado de seguir lo recomendado por el autor David Fulford (Fulford, 1996), se puede comprobar que con el segundo grupo de mezcladores se puede obtener un diseño de mezclador que alcance un rendimiento térmico más elevado; así como un mayor porcentaje de monóxido de carbono neutro en las emisiones.

En lo que respecta al grupo de modelos de mezcladores para su uso con gas licuado de petróleo (GLP), se puede observar que en los mezcladores producidos para usarse con gas licuado de petróleo los niveles de rendimiento térmico están, en su mayoría, por debajo del valor mínimo recomendado; alcanzando un rendimiento térmico por encima del límite establecido por la norma NCh927/1 (Instituto de Normalización Chilena, 2008) solo con los modelo GLP-5 y GLP-2.

Debe mencionarse que la longitud más amplia en la sección convergente del modelo GLP-5 no necesariamente está asociada a la obtención del punto más alto de eficiencia térmica en modelos con GLP. Esto puede verse tras comparar los resultados del modelo GLP-1 y GLP-3 (ver Tablas A.1 y A.5 en ANEXO A), según los cuales se puede determinar que el aumentar la sección convergente no conlleva un crecimiento de los valores de eficiencia térmica, sino una reducción en los resultados, pudiendo llegar esta disminución a ser 3% como máximo.

Asimismo, la variación del ángulo de entrada, pasando de los 40° usados en el modelo GLP-3 a los 13.8° del modelo GLP-6, permite mejorar los valores del rendimiento

térmico levemente; sin embargo, debido a la reducción de la abertura de entrada de aire primario, en la mezcla aire - gas combustible existe un mayor porcentaje de GLP, produciendo que el porcentaje de monóxido de carbono en las emisiones se dupliquen, tal como se puede comprobar al comparar los resultados mostrados en los mezcladores GLP-3 y GLP-6 (ver Tablas A.5 y A.11 en ANEXO A).

Por su parte, se comprueba que una reducción en el largo de la sección divergente de 25% sí puede elevar los niveles de rendimiento térmico en 2% como máximo, tal como se puede inferir tras contrastar los resultados de los ensayos con los mezcladores GLP-1 y GLP-2 (ver Tablas A.1 y A.3 en ANEXO A).

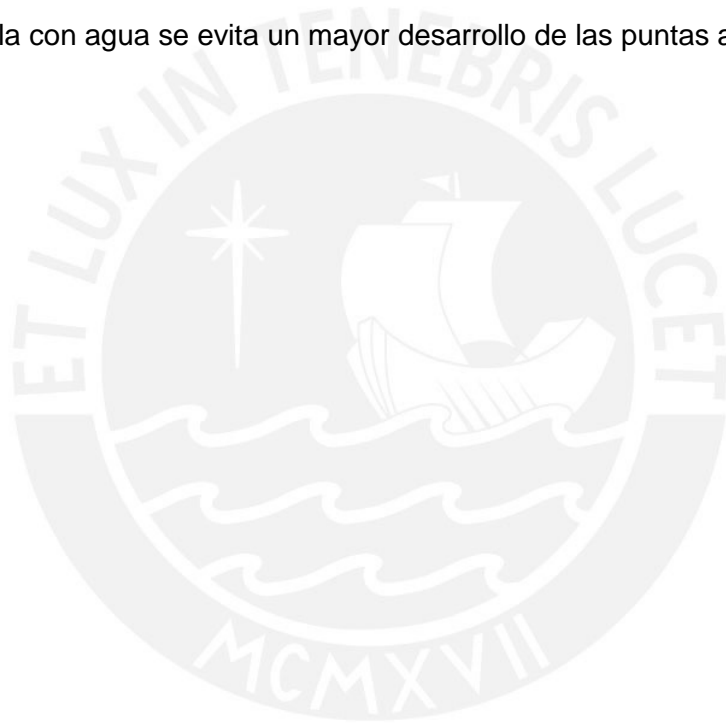
A diferencia de los modelos para gas licuado de petróleo, los modelos de gas natural sí pueden alcanzar niveles de rendimiento térmico por encima del 58% recomendado por la norma técnica chilena NCh927/1 (Instituto de Normalización Chilena, 2008), siendo los valores más altos los obtenidos con los modelos GN-2 y GN-5; coincidiendo así con lo visto en los modelos de GLP. Por otro lado, si se les compara con su contraparte para GLP, los modelos GLP-2 y GLP-5, se puede notar que las emisiones de monóxido de carbono producidas son menores que estas, reduciendo sus emisiones hasta en 26% y 50% respectivamente; demostrando que el uso de gas natural genera un menor impacto ambiental, a comparación del gas licuado de petróleo.

Con lo obtenido en los ensayos con los modelos para gas natural se puede validar lo ya descrito por los mezcladores de GLP, esto es que la reducción de la sección divergente puede incrementar el rendimiento térmico del quemador en 2% aproximadamente como máximo (ver Tablas A.1 y A.2 en ANEXO A), mientras que el aumento de la sección convergente (entrada) no representa una mejora considerable.

Cabe destacar que las incertidumbres obtenidas de los rendimientos térmicos alcanzados son, en su mayoría, valores por debajo del 1,00%, siendo la única excepción un caso del mezclador GLP-3 (ver Tabla A.5 en ANEXO A). En general, las incertidumbres totales calculadas poseen un valor aproximado de 0,60% para las pruebas con GLP, mientras que para gas natural se ha determinado 0.30%; de modo que la dispersión de datos se mantiene similar. Además, se puede reconocer en las tablas (ver ANEXOS A y B) que la incertidumbre total se incrementa en los ensayos a

medida que aumenta la distancia inyector-mezclador (distancia “d”), de manera que se concluye que la principal fuente de incertidumbre en la estimación del rendimiento térmico es esta distancia.

Por último, en todos los mezcladores se obtuvo una tendencia decreciente en cuanto a las emisiones de monóxido de carbono neutro, a medida que se alejaba el inyector de la entrada del mezclador o al elevar la distancia de la olla con respecto a la hornilla hasta 3 centímetro de distancia. El primero se debe a que al separar el inyector del mezclador se permite el ingreso de una mayor flujo de aire inducido, de manera que la mezcla pueda contener una menor concentración de combustible; mientras que al elevar la olla con agua se evita un mayor desarrollo de las puntas amarillas en la flama.



## BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española del Gas (SEDIGAS). (2011). *Combustión de los aparatos de gas. Especificaciones técnicas de SEDIGAS para personal de pruebas previas, puesta en servicio e inspección periódica.*
- Barreras, A., & Pujol, R. (1966). *La Combustión.* Barcelona: Grupo Editorial Ceac, S.A, pp.44.
- Baukal, C. E. (2003). *Industrial Burners Handbook.* Nueva York: CRC Press LLC, pp. 99-112.
- Bisso, J. (2015). *Determinación de la Velocidad de Llama laminar en un quemador de premezcla.* Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Borras, E. (1987). *Gas Natural: Características, Distribución y Sus Aplicaciones.* Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A, pp. 1-138.
- Carranza Sánchez, Y., & Villa Panesso, A. (2012). *Estudio sobre la influencia de la potencia calorífica del quemador y el tipo de recipiente en la eficiencia de cocción a nivel residencial.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica.* Séptima Edición. México D.F: McGraw-Hill Interamericana, pp. 173-190.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos.* Primera Edición. México D.F: McGraw-Hill Interamericana, pp. 615-622.
- Comisión Europea. (2003). *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook (WETO).* Recuperado el 14 de Abril de 2015, de <http://espas.eu/orbis/sites/default/files/generated/document/en/WETO.pdf>
- Flores, D. (s.f). *Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural-Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión.* Medellín: Universidad de Antioquia, pp. 30-31.
- Fulford, D. (1996). *Biogas Stove Design. Material del curso "Renewable Energy and the Environment" para Máster en Ciencias.* Reading: University of Reading.
- Gohil, P., & Channiwala, S. (2011). Experimental Investigation Of Performance Of Conventional LPG Cooking stove. *Volumen 1.* Surat: Thermal Science and Engineering. Recuperado el 20 de Enero de 2017, de [http://www.frdint.com/experimental\\_investigation\\_of\\_performance.pdf](http://www.frdint.com/experimental_investigation_of_performance.pdf)
- Gonzáles, A. (2010). *Comparación de Energías y Gases de Efecto Invernadero en Calentamiento.* Bariloche: Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA).

- INDECOPI. (2006). *Gas Natural Seco. Sistema de Tuberías para Instalaciones Internas Residenciales y Comerciales*. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, pp. 22.
- INNOVAPUCP. (2010). *Evaluación de Aspectos Técnicos de las Propuestas Presentadas a la LPI 001-2010/GLP: Informe N°2010-007-09*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Instituto de Normalización Chilena. (2008). *Artefactos de uso doméstico para cocinar, que utilizan combustibles gaseosos-Parte1: Requisitos generales de fabricación y métodos de ensayo*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2000). *Artefactos de uso doméstico para cocinar, que utilizan combustibles gaseosos - Requisitos e Inspección*.
- Jones, H. (1989). *The application of combustion principles to domestic gas burner design*. Londres: British Gas, pp. 32-46.
- Lagarza, C. (2009). *Mezclador propuesto en Análisis numérico del flujo en un mezclador de aire combustible para un quemador atmosférico. Tesis en Licenciatura en Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica*. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Márquez, M. (2005). *Combustión y Quemadores*. Primera Edición. Barcelona: Marcobombo S.A.
- Martinez, I. (1992). *Procesos de Combustión: Características. Termodinámica Básica y Aplicada*. Madrid: DOSSA S.A, pp. 7-375. Recuperado el 14 de Abril de 2015, de <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2008a). *Usos y Ventajas del Gas Natural en el Sector Residencial Comercial*. Recuperado el 14 de Abril de 2015, de [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/GAS%20NATURAL%20EN%20EL%20SECTOR%20RESIDCOMERCIAL%20\\_JUNIO%2009\\_.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/GAS%20NATURAL%20EN%20EL%20SECTOR%20RESIDCOMERCIAL%20_JUNIO%2009_.pdf)
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2008b). *Guía N 01. Elaboración de Proyectos de Guías de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y Diagnóstico Energético (Sector Residencial)*. Recuperado el 14 de Abril de 2015, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia01%20Residencial.pdf>
- Namkhat, A., & Jugjai, S. (2010). *The Effect of Primary Air Preheat on the Primary Aeration of a Self- aspirating Burner*. Ubon: Sociedad Tailandesa de Ingenieros Mecánicos (TSME). Recuperado el 20 de Enero de 2017, de [https://www.researchgate.net/publication/273756355\\_The\\_Effect\\_of\\_Primary\\_Air\\_Preheat\\_on\\_the\\_Primary\\_Aeration\\_of\\_a\\_Self-aspirating\\_Burner](https://www.researchgate.net/publication/273756355_The_Effect_of_Primary_Air_Preheat_on_the_Primary_Aeration_of_a_Self-aspirating_Burner)
- Olubiyi, D., Dauda, M., Iheanyichukwu, A., & Olukayode, F. (2014). *Design and Construction of a Biogas Burner* (Vol. 2). Zaria: Palestine Technical University Research Journal.
- OSINERMING. (2014). *Masificación del gas natural en el Perú : experiencia y perspectiva*. Lima: Osinerming, pp. 7-47.



- Pantangji, V. K., Mishra, S., Muthukumar, P., & Reddy, R. (2011). *Studies on porous radiant burners for LPG (liquefied petroleum gas) cooking applications*.
- Point & Click Appliance Repair. (s.f). *Orange and Yellow Flames on a Gas Range – What causes them?* Recuperado el 22 de Mayo de 2016, de <https://pcappliancepair.wordpress.com>
- Rojas, F. (2016). *Tablas Termodinámicas. Material del curso “Termodinámica 1” para Ciencias e Ingeniería*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, pp. 80-81.
- Surange, J., Patil, N., & Rajput, A. (2014). Performance Analysis of Burners used in LPG Cooking Stove-A Review. *Volumen 3*. Maharastra: International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Recuperado el 20 de Enero de 2017, de <http://www.riij.com/open-access/performance-analysis-of-burners-used-in-lpgcooking-stovea-review.pdf>
- Thompson, D., Rivera, J., & Pereyra, P. (2003). *“Introducción a la teoría de Incertidumbres”*. *Manual de laboratorio computarizado de física 1*. Material del curso “Física 1” para Estudios Generales Ciencias.
- Universidad de Valladolid. (2011). *Quemadores para Gases*. Recuperado el 14 de Abril de 2015, de: [https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2012/375/51405/1/Document o9.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51405/1/Document o9.pdf)

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE  
MEZCLADORES AIRE-GAS COMBUSTIBLE PARA UN  
QUEMADOR DE PREMEZCLA DOMÉSTICO DE 1,7 kW**

**ANEXOS**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,**

**que presenta el alumno:**

**Álvarez Olivares, José Alexis**

**ASESOR: Rojas Chávez, Freddy Jesús**

**Lima, Junio del 2018**

## ANEXOS

ANEXO A. Resultados de ensayos de rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en los mezcladores de GLP .....	1
A.1. Mezclador GLP-1 .....	1
A.2. Mezclador GLP-2 .....	2
A.3. Mezclador GLP-3 .....	3
A.4. Mezclador GLP-4 .....	4
A.5. Mezclador GLP-5 .....	5
A.6. Mezclador GLP-6 .....	6
ANEXO B. Resultados de ensayos de rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en los mezcladores de gas natural .....	7
B.1. Mezclador GN-1 .....	7
B.2. Mezclador GN-2 .....	8
B.3. Mezclador GN-3 .....	9
B.4. Mezclador GN-4 .....	10
B.5. Mezclador GN-5 .....	11
B.6. Mezclador GN-6 .....	12

## ANEXO A. Resultados de ensayos de rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en los mezcladores de GLP

### A.1. Mezclador GLP-1

Tabla A.1. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-1, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
0	55,24	0,55	0,21	55,62	0,59	0,6578
	55,97	0,55				
	55,66	0,55				
0,5	55,38	0,55	0,25	55,33	0,60	0,6012
	54,88	0,54				
	55,75	0,55				
1	55,15	0,54	0,43	55,09	0,69	0,5226
	54,31	0,54				
	55,80	0,55				
1,5	54,60	0,54	0,36	54,72	0,64	0,4551
	54,18	0,53				
	55,40	0,55				
2	53,97	0,53	0,49	53,83	0,73	0,4054
	54,60	0,54				
	52,93	0,52				

Tabla A.2. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-1, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.0 cm entre el inyector y el mezclador.

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	55,24	0,55	0,21	55,62	0,59	0,6578
	55,97	0,55				
	55,66	0,55				
1,5	55,15	0,54	0,41	55,40	0,69	0,4868
	56,21	0,55				
	54,85	0,54				
2	55,29	0,55	0,23	55,23	0,59	0,3972
	54,81	0,54				
	55,59	0,55				
2,5	54,50	0,54	0,14	54,44	0,56	0,2896
	54,65	0,54				
	54,17	0,53				
3	53,55	0,53	0,22	53,94	0,58	0,1338
	53,96	0,53				
	54,31	0,54				

## A.2. Mezclador GLP-2

Tabla A.3. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-2, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
0	56,09	0,55	0,46	55,86	0,72	0,6812
	56,53	0,56				
	54,97	0,54				
0,5	57,76	0,57	0,45	57,36	0,72	0,5999
	57,84	0,57				
	56,47	0,56				
1	56,88	0,56	0,12	56,70	0,57	0,5378
	56,77	0,56				
	56,46	0,56				
1,5	54,28	0,54	0,41	54,27	0,68	0,5144
	54,99	0,54				
	53,55	0,53				
2	53,27	0,53	0,10	53,35	0,53	0,4413
	53,23	0,53				
	53,54	0,53				

Tabla A.4. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-2, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla; manteniendo una distancia de 0.5 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	57,76	0,57	0,45	57,36	0,72	0,5999
	57,84	0,57				
	56,47	0,56				
1,5	57,84	0,57	0,23	57,60	0,62	0,4371
	57,14	0,56				
	57,81	0,57				
2	56,58	0,56	0,05	56,49	0,56	0,3461
	56,40	0,56				
	56,50	0,56				
2,5	53,75	0,53	0,38	54,40	0,66	0,2703
	55,05	0,54				
	54,39	0,54				
3	51,24	0,51	0,58	52,40	0,78	0,2151
	53,12	0,52				
	52,83	0,52				

### A.3. Mezclador GLP-3

Tabla A.5. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-3, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-0,5	54,13	0,53	0,42	54,88	0,68	0,4661
	54,93	0,54				
	55,57	0,55				
0	55,14	0,54	0,40	55,63	0,68	0,4151
	56,43	0,56				
	55,32	0,55				
0,5	55,27	0,55	0,34	55,14	0,64	0,3723
	54,49	0,54				
	55,66	0,55				
1	54,35	0,54	0,49	54,58	0,72	0,2565
	53,87	0,53				
	55,51	0,55				
1,5	52,46	0,52	0,96	51,74	1,09	0,2137
	52,93	0,52				
	49,83	0,49				

Tabla A.6. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-3, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla; manteniendo una distancia de 0.0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	55,14	0,54	0,40	55,63	0,69	0,4151
	56,43	0,56				
	55,32	0,55				
1,5	55,15	0,54	0,17	55,44	0,57	0,3310
	55,75	0,55				
	55,43	0,55				
2	55,68	0,55	0,25	55,19	0,60	0,3103
	55,04	0,54				
	54,84	0,54				
2,5	55,34	0,55	0,10	55,14	0,56	0,2524
	55,03	0,54				
	55,04	0,54				
3	53,33	0,53	0,22	53,72	0,58	0,1365
	54,07	0,53				
	53,76	0,53				

#### A.4. Mezclador GLP-4

Tabla A.7. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-4, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-0,5	54,92	0,54	0,09	54,93	0,55	0,6909
	54,77	0,54				
	55,09	0,54				
0	55,89	0,55	0,56	55,09	0,79	0,5881
	54,01	0,53				
	55,37	0,55				
0,5	55,94	0,55	0,09	55,88	0,56	0,5592
	55,71	0,55				
	55,99	0,55				
1	55,85	0,55	0,11	55,79	0,56	0,5337
	55,95	0,55				
	55,57	0,55				
1,5	52,20	0,52	0,10	52,23	0,53	0,4744
	52,08	0,51				
	52,42	0,52				

Tabla A.8. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-4, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.5 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	55,94	0,55	0,09	55,88	0,56	0,5599
	55,71	0,55				
	55,99	0,55				
1,5	55,67	0,55	0,16	55,62	0,57	0,5047
	55,31	0,55				
	55,87	0,55				
2	55,15	0,54	0,13	55,23	0,56	0,4530
	55,48	0,55				
	55,04	0,54				
2,5	54,60	0,54	0,21	54,93	0,58	0,3875
	54,87	0,54				
	55,32	0,55				
3	54,03	0,53	0,15	54,05	0,55	0,2779
	53,81	0,53				
	54,33	0,54				

## A.5. Mezclador GLP-5

Tabla A.9. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-5, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1,5	57,27	0,57	0,13	57,38	0,58	0,7378
	57,65	0,57				
	57,23	0,56				
-1	58,72	0,58	0,46	57,81	0,74	0,6674
	57,40	0,57				
	57,29	0,57				
-0,5	58,49	0,58	0,69	58,25	0,90	0,5157
	59,31	0,59				
	56,95	0,56				
0	57,35	0,57	0,53	58,37	0,78	0,5364
	58,66	0,58				
	59,12	0,58				
0,5	56,21	0,55	0,28	56,77	0,63	0,4744
	57,05	0,56				
	57,06	0,56				
1	54,02	0,53	0,52	53,80	0,75	0,4275
	52,80	0,52				
	54,56	0,54				
1,5	47,66	0,47	0,21	47,88	0,52	0,3323
	48,30	0,48				
	47,68	0,47				

Tabla A.10. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-5, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	58,49	0,58	0,58	58,37	0,82	0,5364
	59,31	0,59				
	57,32	0,57				
1,5	58,09	0,57	0,10	58,14	0,58	0,3765
	57,99	0,57				
	58,33	0,58				
2	56,92	0,56	0,40	57,50	0,70	0,2868
	58,25	0,57				
	57,31	0,57				
2,5	56,13	0,55	0,26	55,70	0,61	0,1558
	55,71	0,55				
	55,24	0,55				
3	55,21	0,54	0,13	55,10	0,56	0,1310
	55,23	0,55				
	54,85	0,54				



## A.6. Mezclador GLP-6

Tabla A.11. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-6, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
0	56,85	0,56	0,02	56,82	0,56	0,5406
	56,78	0,56				
	56,84	0,56				
0,5	56,27	0,56	0,05	56,22	0,56	0,4992
	56,12	0,55				
	56,27	0,56				
1	55,05	0,54	0,36	55,57	0,66	0,4551
	56,26	0,56				
	55,39	0,55				
1,5	54,55	0,54	0,10	54,74	0,55	0,4289
	54,88	0,54				
	54,78	0,54				
2	52,13	0,51	0,45	52,46	0,69	0,3834
	53,36	0,53				
	51,90	0,51				

Tabla A.12. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GLP-6, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	56,85	0,56	0,02	56,82	0,56	0,5406
	56,78	0,56				
	56,84	0,56				
1,5	56,76	0,56	0,15	56,47	0,58	0,4454
	56,27	0,56				
	56,39	0,56				
2	56,32	0,56	0,09	56,14	0,56	0,4054
	56,10	0,55				
	56,01	0,55				
2,5	54,60	0,54	0,34	54,21	0,64	0,2799
	54,49	0,54				
	53,54	0,53				
3	53,03	0,52	0,18	53,37	0,56	0,1351
	53,64	0,53				
	53,44	0,53				

## ANEXO B. Resultados de ensayos de rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en los mezcladores de gas natural

### B.1. Mezclador GN-1

Tabla B.1. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-1, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	56,59	0,23	0,12	56,62	0,26	0,4498
	56,43	0,23				
	56,85	0,23				
-0,5	58,06	0,23	0,10	57,99	0,25	0,4141
	57,79	0,23				
	58,12	0,23				
0	58,92	0,24	0,10	58,79	0,26	0,3737
	58,58	0,24				
	58,86	0,24				
0,5	58,36	0,23	0,13	58,35	0,27	0,2785
	58,58	0,24				
	58,12	0,23				
1	57,29	0,23	0,16	57,59	0,28	0,2725
	57,63	0,23				
	57,86	0,23				
1,5	53,42	0,21	0,42	53,91	0,48	0,2392
	54,75	0,22				
	53,56	0,22				

Tabla B.2. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-1, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0,0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	58,92	0,24	0,10	58,79	0,26	0,3737
	58,58	0,24				
	58,86	0,24				
1,5	58,59	0,24	0,25	58,49	0,34	0,3392
	58,02	0,23				
	58,86	0,24				
2	58,97	0,24	0,41	58,37	0,48	0,2618
	57,58	0,23				
	58,56	0,24				
2,5	57,00	0,23	0,15	57,23	0,27	0,1940
	57,51	0,23				
	57,18	0,23				
3	56,50	0,23	0,19	56,84	0,30	0,1333
	57,14	0,23				
	56,89	0,23				

## B.2. Mezclador GN-2

Tabla B.3. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-2, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	57,11	0,23	0,12	57,14	0,26	0,4546
	56,95	0,23				
	57,35	0,23				
-0,5	57,82	0,23	0,12	58,02	0,26	0,3475
	58,25	0,23				
	58,01	0,23				
0	58,48	0,24	0,39	58,45	0,45	0,2451
	57,77	0,23				
	59,11	0,24				
0,5	59,24	0,24	0,27	59,58	0,36	0,2797
	59,39	0,24				
	60,10	0,24				
1	58,09	0,23	0,41	58,52	0,47	0,2190
	59,34	0,24				
	58,14	0,23				
1,5	55,92	0,22	0,27	56,10	0,35	0,2499
	55,76	0,22				
	56,62	0,23				

Tabla B.4. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-2, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.5 cm entre el inyector y el mezclador.

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	59,24	0,24	0,27	59,58	0,36	0,2797
	59,39	0,24				
	60,10	0,24				
1,5	59,47	0,24	0,20	59,09	0,31	0,2695
	58,80	0,24				
	59,01	0,24				
2	59,18	0,24	0,11	58,96	0,26	0,1874
	58,88	0,24				
	58,83	0,24				
2,5	57,51	0,23	0,19	57,21	0,30	0,1232
	56,86	0,23				
	57,27	0,23				
3	55,66	0,22	0,29	56,19	0,37	0,1006
	56,28	0,23				
	56,65	0,23				

### B.3. Mezclador GN-3

Tabla B.5. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en el mezclador GN-3, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de -0.5 cm entre el inyector y el mezclador.

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	58,42	0,23	0,13	58,25	0,27	0,4760
	57,99	0,23				
	58,34	0,23				
-0,5	58,52	0,24	0,23	58,44	0,33	0,4522
	58,01	0,23				
	58,78	0,24				
0	58,15	0,23	0,19	57,85	0,30	0,4415
	57,91	0,23				
	57,50	0,23				
0,5	57,50	0,23	0,16	57,46	0,28	0,3903
	57,72	0,23				
	57,17	0,23				
1	55,69	0,22	0,29	55,22	0,37	0,3749
	55,28	0,22				
	54,68	0,22				
1,5	52,33	0,21	0,19	52,71	0,29	0,3273
	52,81	0,21				
	52,98	0,21				

Tabla B.6. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-3, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	58,52	0,24	0,23	58,44	0,33	0,4522
	58,01	0,23				
	58,78	0,24				
1,5	58,15	0,23	0,10	58,25	0,26	0,4165
	58,13	0,23				
	58,46	0,24				
2	58,07	0,23	0,12	57,85	0,26	0,3487
	57,64	0,23				
	57,83	0,23				
2,5	57,31	0,23	0,11	57,14	0,25	0,1845
	57,17	0,23				
	56,94	0,23				
3	55,89	0,22	0,05	55,95	0,23	0,1523
	56,06	0,23				
	55,90	0,22				

#### B.4. Mezclador GN-4

Tabla B.7. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-4, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	57,44	0,23	0,13	57,56	0,27	0,5355
	57,41	0,23				
	57,83	0,23				
-0,5	57,89	0,23	0,16	58,17	0,28	0,4653
	58,18	0,23				
	58,45	0,24				
0	57,57	0,23	0,37	58,15	0,43	0,4463
	58,04	0,23				
	58,83	0,24				
0,5	58,79	0,24	0,22	59,17	0,32	0,4129
	59,54	0,24				
	59,20	0,24				
1	59,13	0,24	0,14	59,10	0,27	0,3808
	58,85	0,24				
	59,33	0,24				
1,5	58,04	0,23	0,48	57,30	0,54	0,3499
	56,39	0,23				
	57,47	0,23				

Tabla B.8. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en el mezclador GN-4, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.5 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	58,79	0,24	0,22	59,17	0,32	0,4129
	59,54	0,24				
	59,20	0,24				
1,5	59,03	0,24	0,13	58,95	0,27	0,3213
	58,68	0,24				
	59,12	0,24				
2	59,07	0,24	0,18	58,75	0,30	0,2428
	58,44	0,24				
	58,74	0,24				
2,5	57,69	0,23	0,31	58,25	0,39	0,1904
	58,31	0,23				
	58,76	0,24				
3	56,19	0,23	0,32	56,63	0,39	0,1202
	57,26	0,23				
	56,44	0,23				

## B.5. Mezclador GN-5

Tabla B.9. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-5, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	58,73	0,24	0,28	58,66	0,37	0,5248
	58,14	0,23				
	59,12	0,24				
-0,5	59,08	0,24	0,09	59,25	0,26	0,4879
	59,25	0,24				
	59,41	0,24				
0	59,19	0,24	0,08	59,31	0,25	0,4361
	59,28	0,24				
	59,46	0,24				
0,5	57,94	0,23	0,06	58,03	0,24	0,3772
	58,15	0,23				
	58,00	0,23				
1	57,63	0,23	0,06	57,66	0,24	0,3630
	57,59	0,23				
	57,77	0,23				
1,5	57,10	0,23	0,11	57,10	0,25	0,2475
	56,92	0,23				
	57,29	0,23				

Tabla B.10. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en el mezclador GN-5, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de 0.0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	59,19	0,24	0,08	59,31	0,25	0,4361
	59,28	0,24				
	59,46	0,24				
1,5	59,32	0,24	0,10	59,27	0,26	0,3415
	59,08	0,24				
	59,41	0,24				
2	59,11	0,24	0,06	58,98	0,25	0,2368
	58,95	0,24				
	58,89	0,24				
2,5	58,78	0,24	0,27	58,34	0,36	0,1595
	58,42	0,24				
	57,83	0,23				
3	57,53	0,23	0,34	58,06	0,42	0,1083
	58,70	0,24				
	57,94	0,23				

## B.6. Mezclador GN-6

Tabla B.11. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro usando el mezclador GN-6, según la distancia "d" del inyector con respecto al mezclador

Distancia "d" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
-1	58,38	0,23	0,09	58,19	0,25	0,4736
	58,14	0,23				
	58,06	0,23				
-0,5	57,26	0,23	0,32	57,66	0,39	0,4415
	57,42	0,23				
	58,29	0,23				
0	57,86	0,23	0,11	57,73	0,26	0,3915
	57,51	0,23				
	57,81	0,23				
0,5	57,50	0,23	0,10	57,70	0,25	0,3475
	57,83	0,23				
	57,78	0,23				
1	57,19	0,23	0,28	57,48	0,36	0,3058
	58,03	0,23				
	57,20	0,23				
1,5	56,85	0,23	0,10	56,98	0,25	0,2440
	56,92	0,23				
	57,17	0,23				

Tabla B.12. Rendimiento térmico y porcentaje de monóxido de carbono neutro en el mezclador GN-6, según la altura "h" entre la superficie inferior de la olla y la hornilla, manteniendo una distancia de -1.0 cm entre el inyector y el mezclador

Altura "h" (cm)	Rendimiento Térmico (%)	Incertidumbre de lectura (%)	Incertidumbre de Fluctuación (%)	Rendimiento Térmico Promedio (%)	Incertidumbre Total (%)	Monóxido de carbono neutro (%)
1	58,38	0,23	0,09	58,19	0,25	0,4736
	58,14	0,23				
	58,06	0,23				
1,5	58,43	0,24	0,27	57,95	0,35	0,4153
	57,90	0,23				
	57,51	0,23				
2	57,82	0,23	0,19	57,48	0,30	0,3499
	57,46	0,23				
	57,15	0,23				
2,5	57,30	0,23	0,10	57,14	0,25	0,2309
	56,95	0,23				
	57,17	0,23				
3	56,69	0,23	0,16	56,65	0,28	0,1618
	56,36	0,23				
	56,91	0,23				

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE  
MEZCLADORES AIRE-GAS COMBUSTIBLE PARA UN  
QUEMADOR DE PREMEZCLA DOMÉSTICO DE 1,7 kW**

**PLANOS**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,**

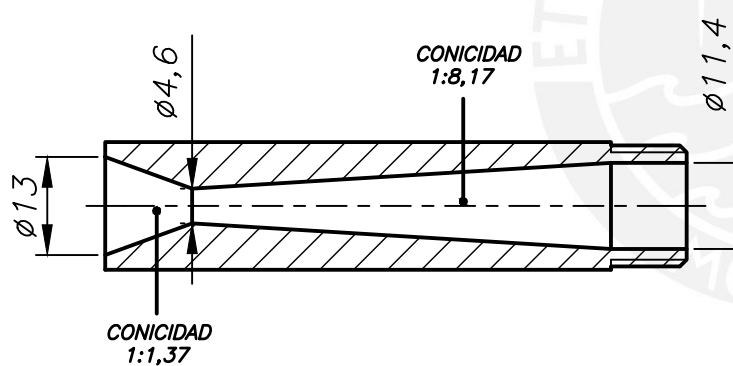
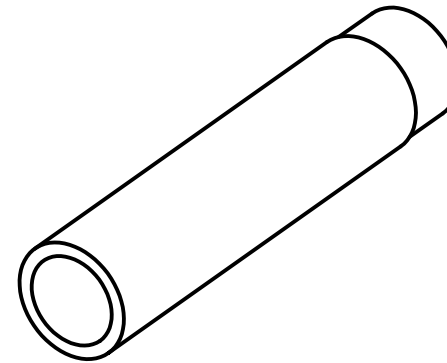
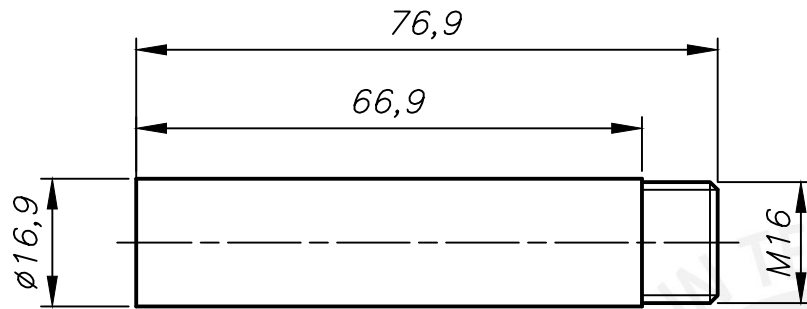
**que presenta el alumno:**

**Álvarez Olivares, José Alexis**

**ASESOR: Rojas Chávez, Freddy Jesús**

**Lima, Junio del 2018**



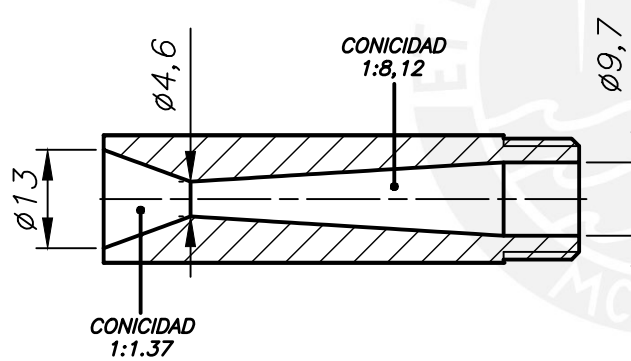
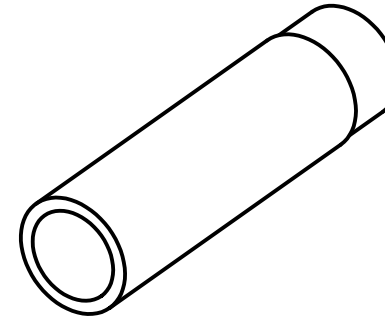
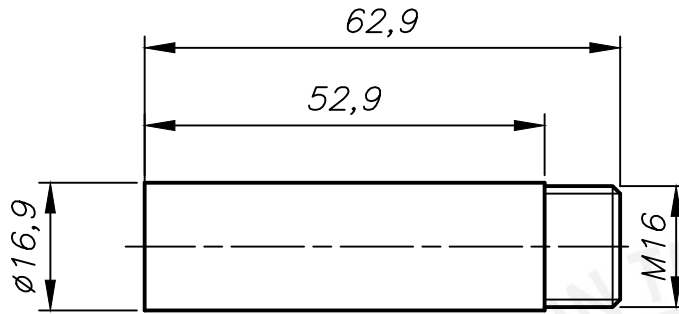


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP MEZCLADOR GLP-1	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	REVISADO: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

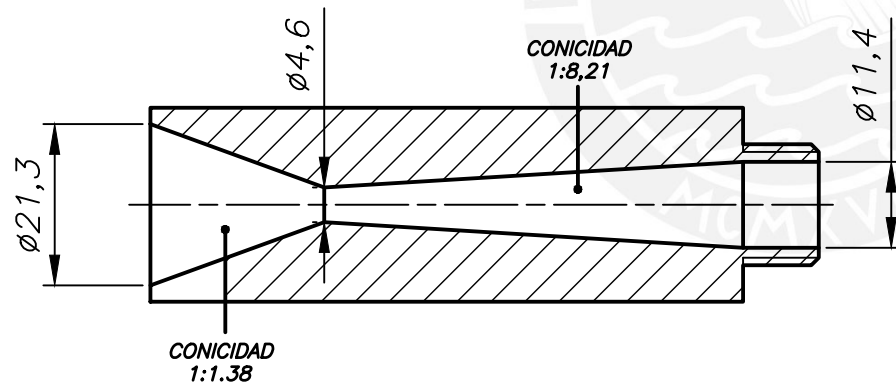
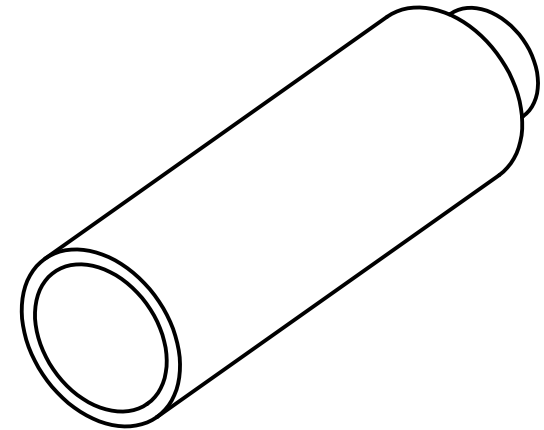
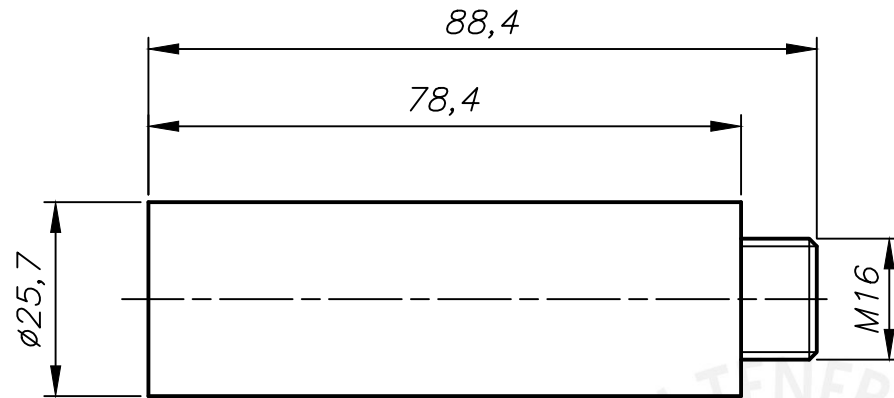


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP MEZCLADOR GLP-2	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	REVISADO: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

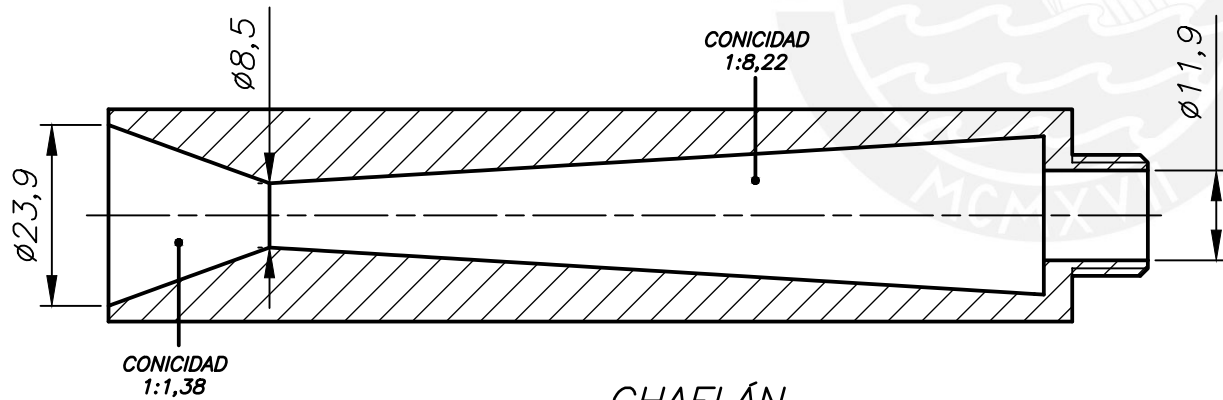
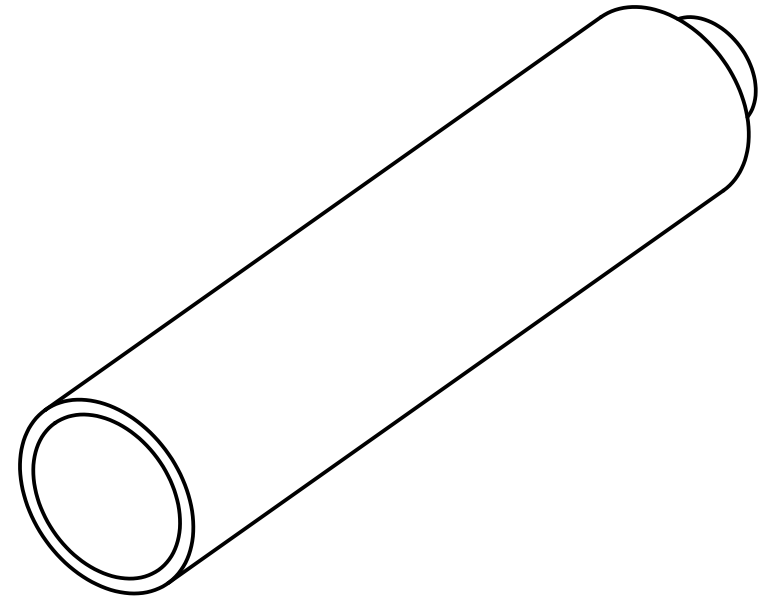
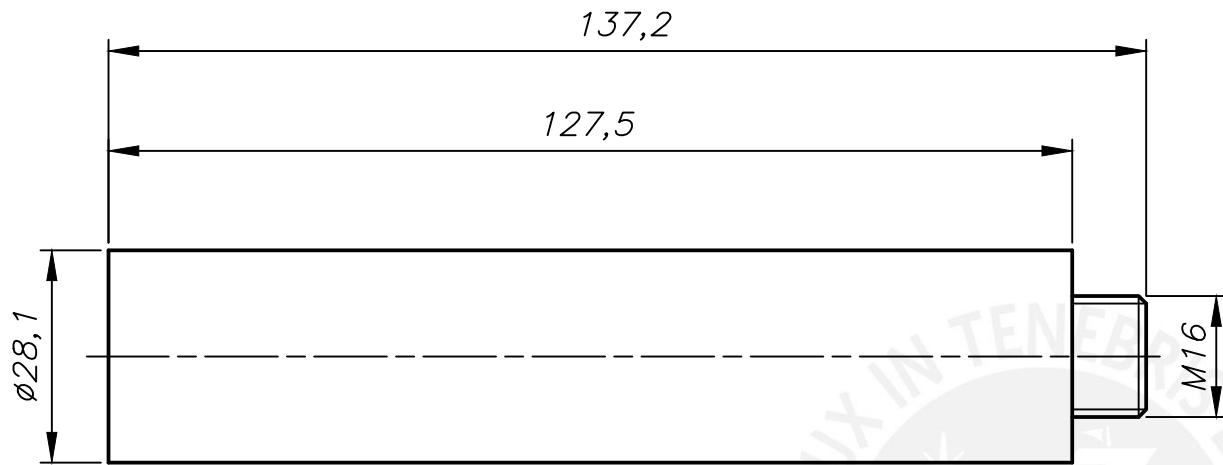


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERIA - INGENIERIA MECANICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP MEZCLADOR GLP-3	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ALVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	REVISADO: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

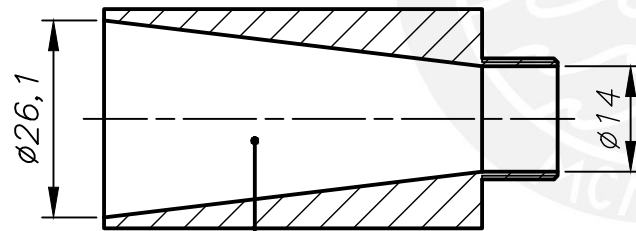
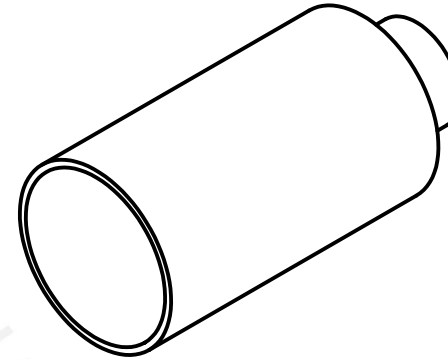
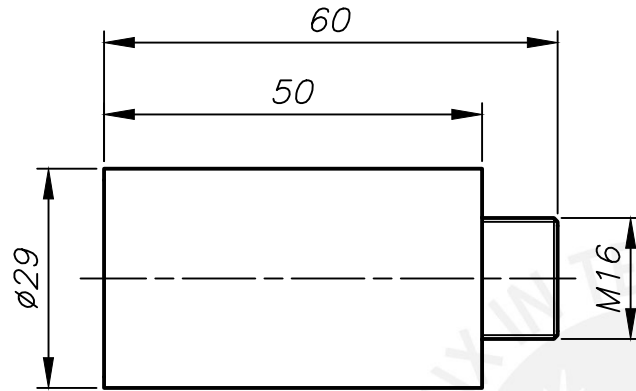


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP MEZCLADOR GLP-4	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	REVISADO: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4



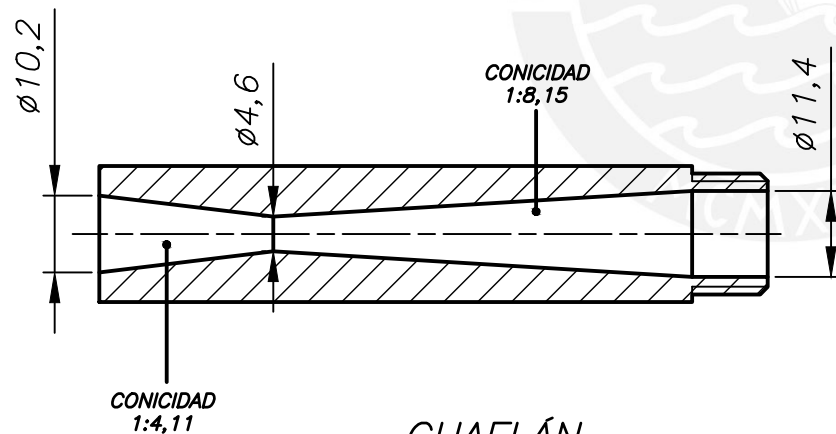
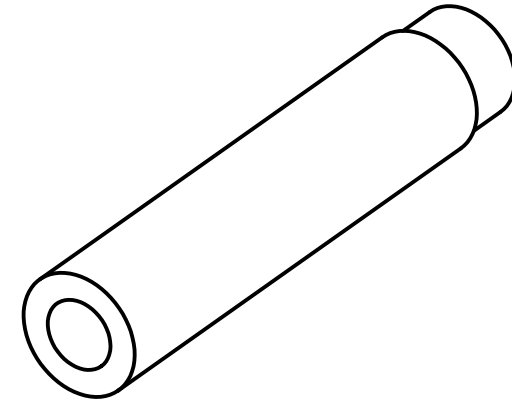
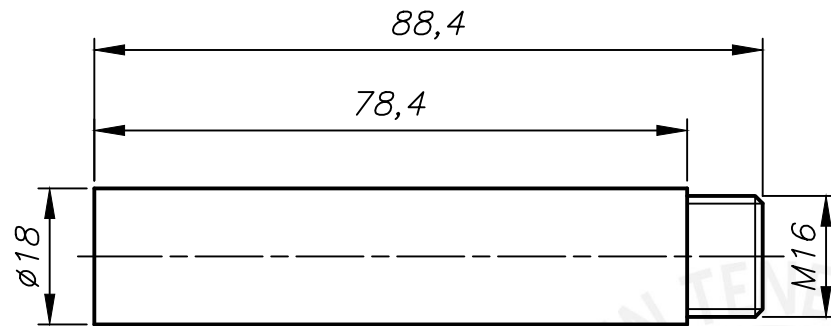
CONICIDAD  
1:4,13

CHAFLÁN  
0,5 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP/GN MEZCLADOR GLP-5/GN-5	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

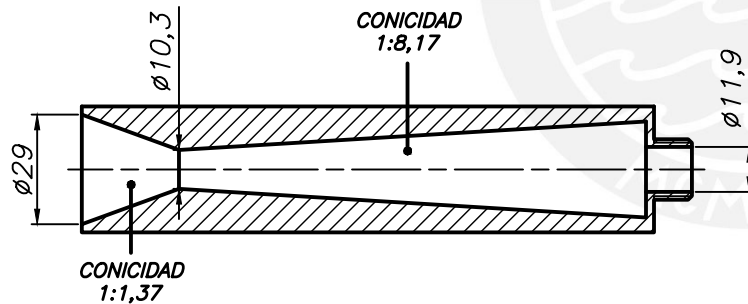
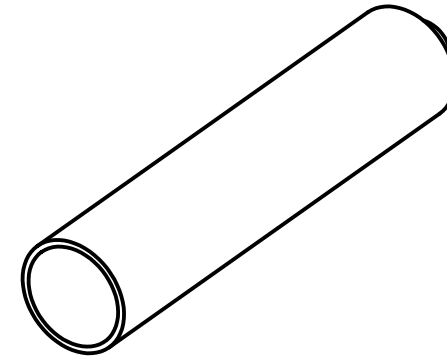
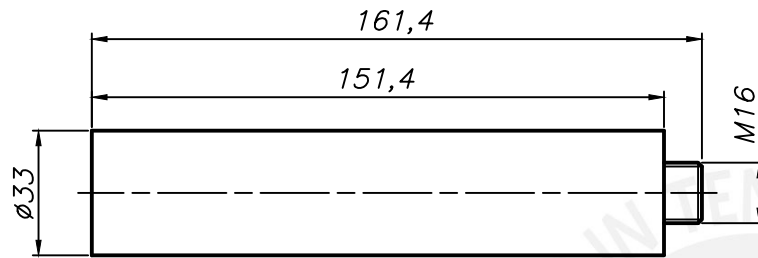


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERIA - INGENIERIA MECANICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GLP MEZCLADOR GLP-6	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ALVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

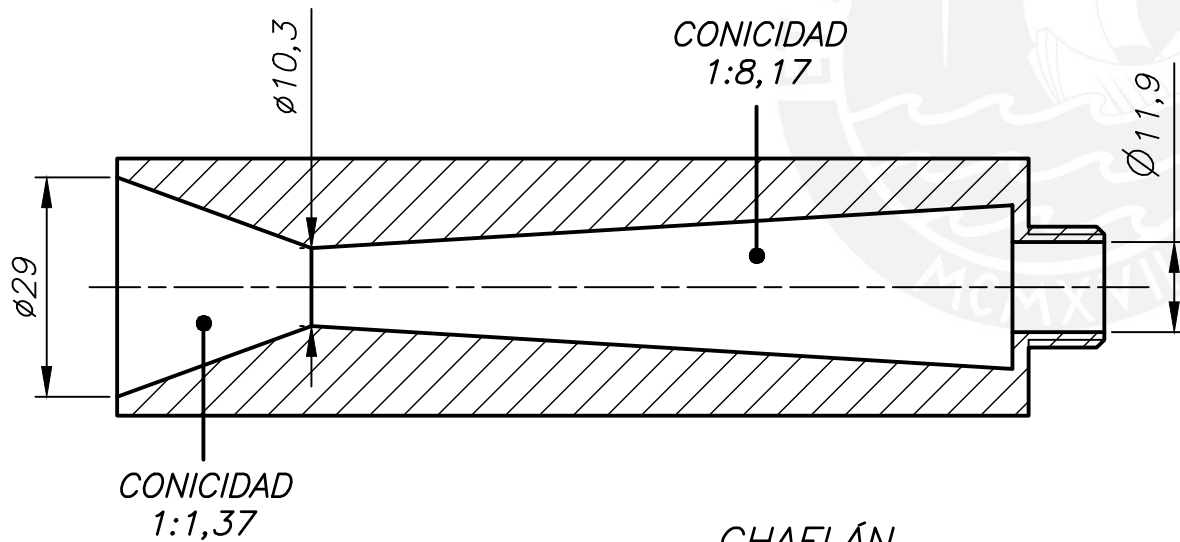
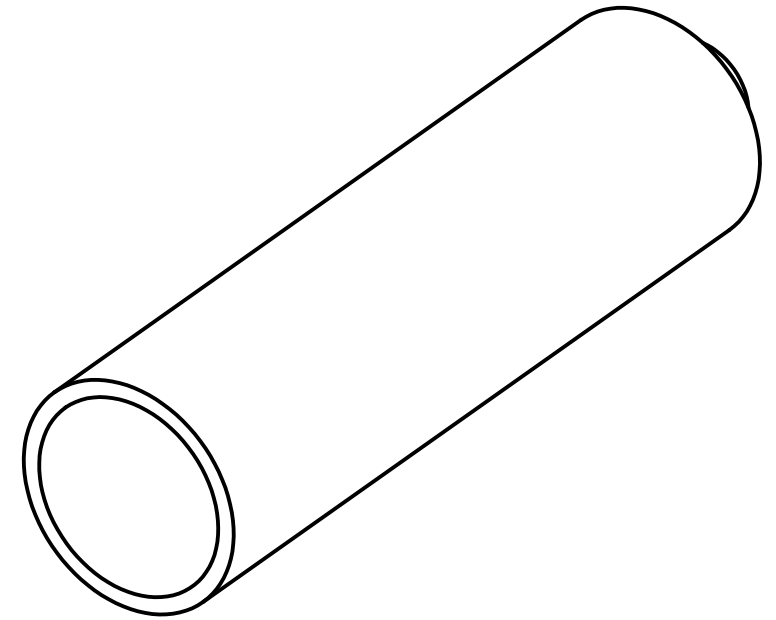
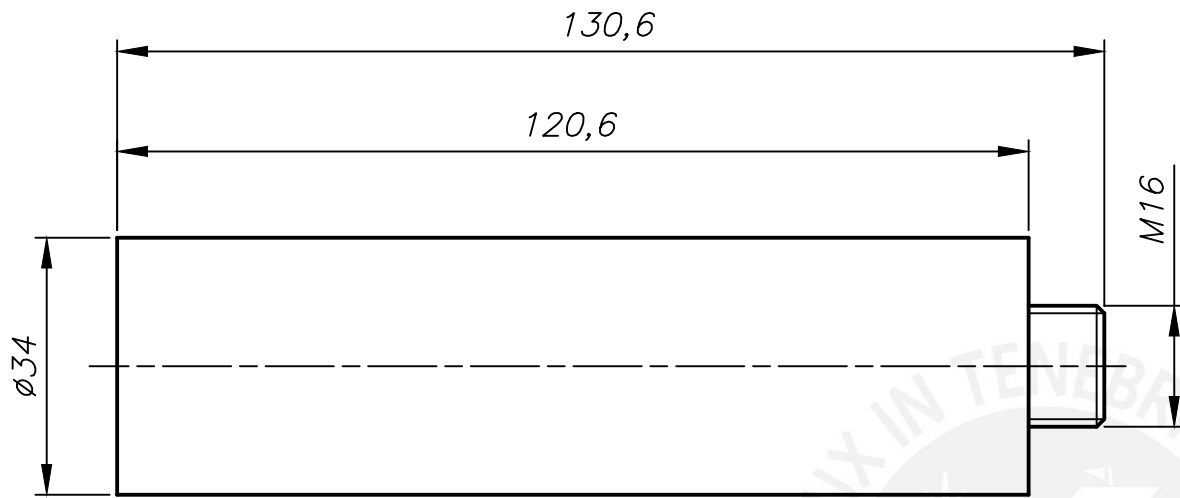


CHAFLÁN  
1 X 45°

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GN MEZCLADOR GN-1	ESCALA 1:2
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5



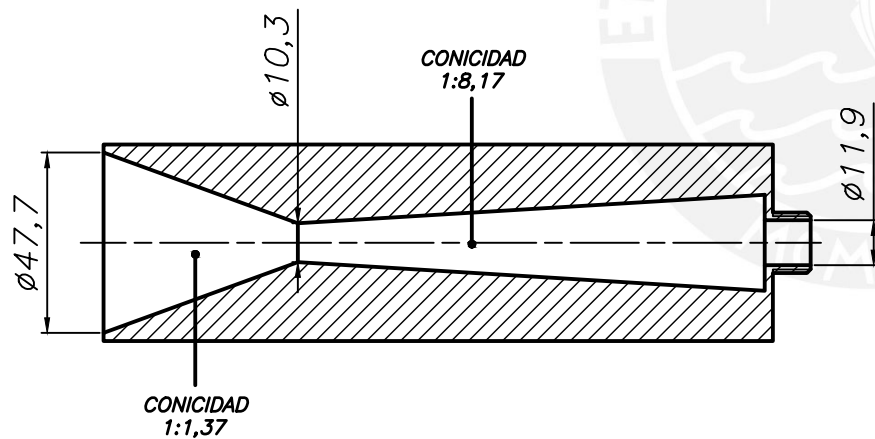
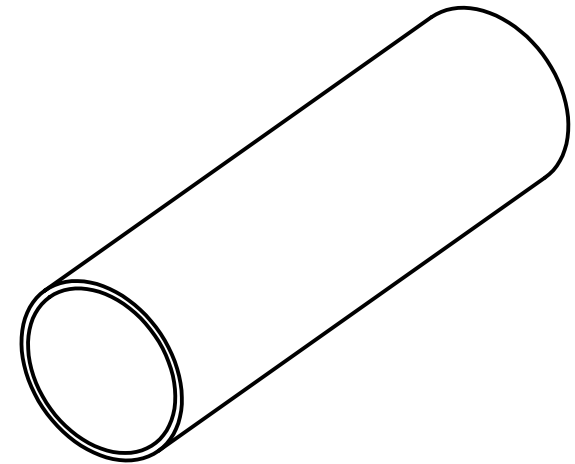
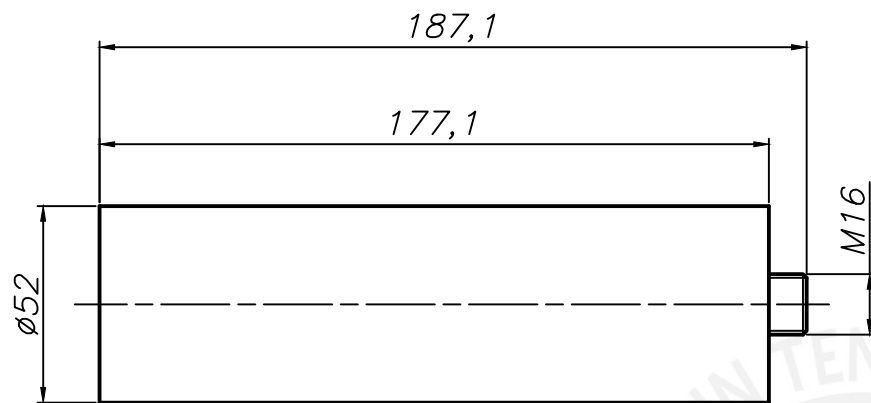
TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$

CHAFLÁN  
1 X 45°

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GN MEZCLADOR GN-2	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4



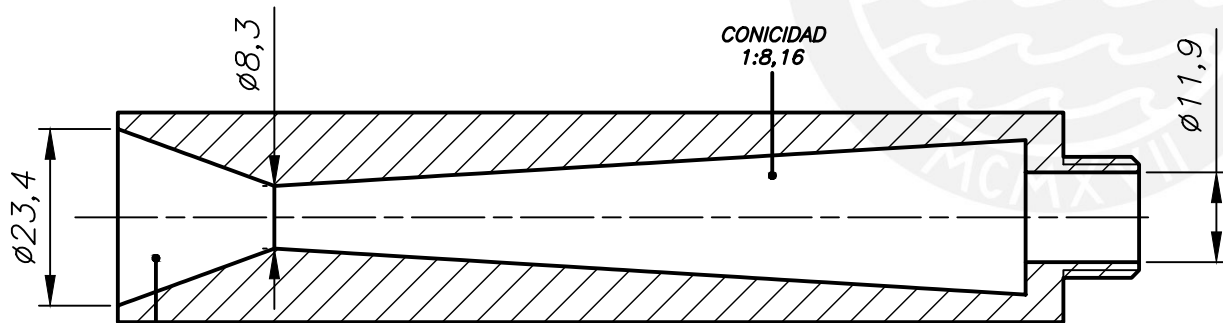
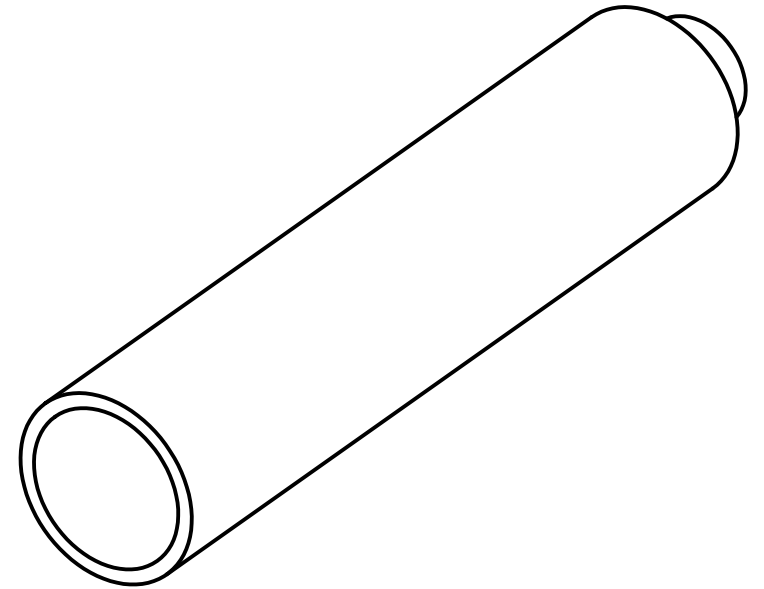
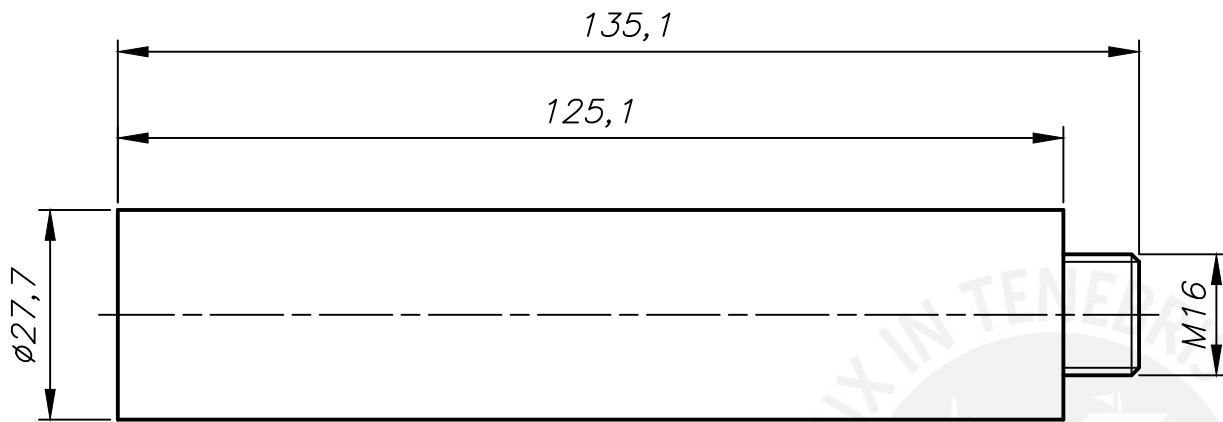


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GN MEZCLADOR GN-3	ESCALA 1:2
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4

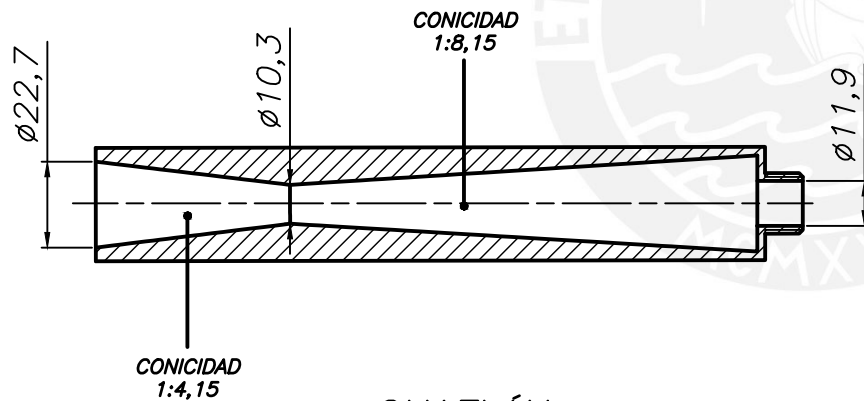
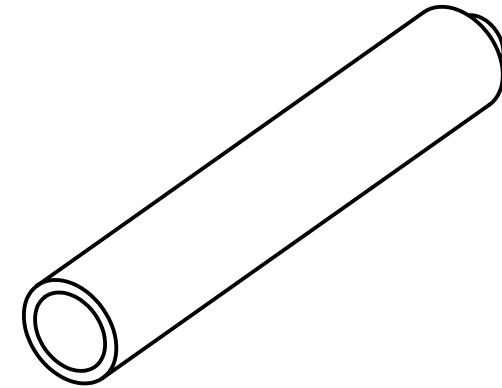
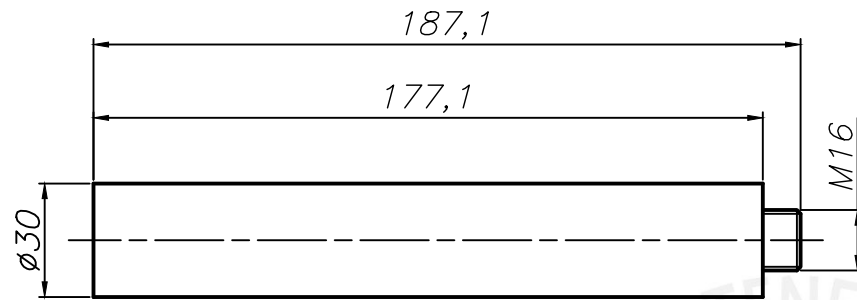


CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GN MEZCLADOR GN-4	ESCALA 1:1
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	REVISADO: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4



CHAFLÁN  
1 X 45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 - MEDIO	MATERIAL Bronce ASTM B-145
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	MEZCLADOR DE GN MEZCLADOR GN-6	ESCALA 1:2
20090429	DIBUJANTE: ÁLVAREZ OLIVARES, ALEXIS	FECHA: 2018.05.31
	SUPERVISOR: ROJAS CHÁVEZ, FREDDY	LAMINA: A4