

**REINGENIERÍA APLICADA A UNA MARMITA DE TIPO AUTOGENERADORA
DE VAPOR CONSTRUIDA POR LA CORPORACIÓN CDT DE GAS PARA EL
SECTOR AGROINDUSTRIAL**

LEONARDO ENRIQUE RIVERA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**REINGENIERÍA APLICADA A UNA MARMITA DE TIPO AUTOGENERADORA
DE VAPOR CONSTRUIDA POR LA CORPORACIÓN CDT DE GAS PARA EL
SECTOR AGROINDUSTRIAL**

LEONARDO ENRIQUE RIVERA HERNÁNDEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

Ingeniero Mecánico

Codirector

VÍCTOR JOSÉ MANRIQUE MORENO

Ingeniero Mecánico

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas –CDT DE GAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

A cada uno de los profesores de la Universidad Industrial de Santander que con el apoyo desinteresado, su paciencia y sabiduría, compartieron sus conocimientos contribuyendo en mi formación profesional.

A los profesores Julián Jaramillo, Omar Gelvez, Iván Hurtado y Juan Maradey que indirectamente por medio de su pasión en sus ramas de formación, despertaron en mi un gran interés por los sistemas térmicos, mecánica de fluidos, termodinámica y transferencia de calor; una de las razones por la cual decidí hacer mi proyecto enfocado en estas ramas de la ingeniería mecánica.

Nuevamente a mi director de proyecto Ph.D. Julián Jaramillo por sus consejos y recomendaciones además de la confianza puesta en mí.

A cada uno de los profesionales de la corporación CDT de GAS que me trataron como un integrante más de esa “familia CDT de Gas”, porque gracias a sus conocimientos, experiencia y su apoyo, pude superar varios obstáculos presentes a lo largo de este proyecto.

LEONARDO ENRIQUE

RIVERA HERNÁNDEZ

DEDICATORIA

A Dios por regalarme el don de la vida, por llenarme de su fuerza para vencer todos los obstáculos presentes en el corto camino que llevo de vida, porque es Dios, mi manantial en el desierto, luz en la oscuridad, lucero de la noche, amigo consejero, cura de enfermedad, mi paz y felicidad.

A mi madre Gloris Hernández por brindarme todo su amor, el apoyo incondicional, la confianza en cada momento de mi vida, pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentó en mi las bases de responsabilidad, amor por el estudio y el deseo de superación, compartiendo sus virtudes infinitas y su gran corazón.

A mi padre Leonel Rivera por todo el esfuerzo y sacrificio para sacar nuestra familia adelante, porque me mostró la importancia de ser valiente, me enseñó a levantarme con la frente en alto a pesar de los obstáculos presentes en la vida y porque sé, que es capaz de darlo todo por nosotros.

A mi hermano Santiago Rivera, porque lo esperé durante más de 10 años, y realmente valió la pena, porque su llegada lleno de felicidad infinita mi vida.

A mi hermano Alejandro Rivera y mi abuelo Tico, mis ángeles guardianes que me protegen desde el cielo.

A mis tíos Nilson, Karina, Orleny y Juan Carlos Hernández, porque siempre me han tratado como un hijo, me han apoyado en todo lo que ha estado a su alcance y han aportado en mi formación con sus consejos y experiencias, y a toda mi familia que es lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

A mi novia Silvia Gutiérrez, porque además de toda la motivación, aliento, compañía, amor y felicidad que me transmitió durante toda mi carrera, al final fue como mi compañera de proyecto de grado, llenándome de consejos y paciencia en las etapas más dura del desarrollo de este prototipo.

A mis compañeros de clases y amigos con los que he compartido grandes momentos.

LEONARDO ENRIQUE

RIVERA HERNÁNDEZ

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1 ANTECEDENTES	23
2 OBJETIVOS	33
2.1 Objetivo general	33
2.2 Objetivo específico	33
3 MARMITAS	34
3.1 TIPOS DE MARMITAS A GAS NATURAL	34
3.1.1 Vapor directo..	35
3.1.2 Autogeneradora.....	35
3.2 COCCIÓN CON MARMITAS.....	36
3.2.1 Proceso de cocción..	36
3.2.2 Métodos de cocción según el medio en el que se realiza..	36
3.2.2.1 Cocción en medio acuoso.....	36
3.2.3 Funciones del proceso de cocción.	38
4 ESTADO DEL ARTE: MARMITAS AUTOGENERADORAS DE VAPOR	39
4.1 DESARROLLO A NIVEL INTERNACIONAL	40
4.2 DESARROLLO A NIVEL NACIONAL	42
5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UNA MARMITA AUTOGENERADORA.....	44

5.1 MATERIAL.....	44
5.2 FUNCIONAMIENTO.....	45
5.3 TIPO.....	45
5.4 ESTILO.....	45
5.5 CONTROL.....	46
5.6 DESEMPEÑO.....	46
5.6.1 Máxima Energía a la entrada..	47
5.6.2 Capacidad de producción.....	47
5.6.3 Eficiencia Energética de calentamiento.....	47
5.6.4 Consumo a fuego lento..	47
5.7 NORMATIVIDAD TÉCNICA APLICABLE.....	48
6 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA MARMITA.....	50
6.1 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN.....	50
6.2 EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	51
6.3 EFICIENCIA DE CALENTAMIENTO.....	52
6.4 TRANSFERENCIA DE CALOR.....	53
6.4.1 Mecanismos de transferencia de calor.....	53
6.4.1.1 Transferencia de Calor por Conducción.....	53
6.4.1.1.1 Conducción en paredes compuestas:.....	54
6.4.1.1.2 Conducción en Cilindros largos:.....	55
6.4.1.2 Transferencia de calor por convección.....	56
6.4.1.3 Transferencia de Calor por Radiación.....	56
6.4.2 Intercambiadores de calor.....	57
6.4.3 Espesor de aislamiento térmico.....	59
7 REINGENIERÍA: MARMITA AUTOGENERADORA DE VAPOR CONSTRUIDA POR EL CDT DE GAS.....	60
7.1 REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO.....	62
7.2 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS.....	65

7.2.1	Potencia térmica requerida en el nuevo modelo.	68
7.2.1.1	Selección de componentes del tren de gas y control de ignición.	68
7.2.1.1.1	Quemadores atmosféricos.	68
7.2.1.1.2	Válvula de Gas.	70
7.2.1.1.3	Control de Ignición.	71
7.2.2	Diseño intercambiador de calor.	74
7.2.2.1	Partes que componen el intercambiador de calor:	78
7.2.3	Modelo de transferencia de calor.	79
7.3	DISEÑO GEOMÉTRICO DEL RECIPIENTE DEL PRODUCTO.	87
7.4	DISEÑO DE LA CHAQUETA DE VAPOR.	88
7.4.1	Tipos de recipientes encamisados.	90
7.4.2	Diseño del elemento de cierre de la chaqueta al recipiente.	91
7.4.3	Monitor de la presión en la chaqueta de vapor.	93
7.4.3.1	Sensor-transmisor de presión.	93
7.4.3.1.1	Cooling element.	94
7.5	EVACUACIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.	95
7.6	VOLUMEN ÓPTIMO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.	97
7.7	AISLAMIENTO TÉRMICO.	99
8	PROCESO DE MANUFACTURA Y ENSAMBLAJE.	100
8.1	MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	104
9	PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y FUNCIONAMIENTO.	106
9.1	EFICIENCIA DE CALENTAMIENTO.	108
9.1.1	Procedimiento general de determinación de Eficiencia de Calentamiento, según ASTM F1785.	108
9.2	CONSUMO DE ENERGÍA A FUEGO LENTO.	112
9.2.1	Procedimiento general de determinación del Consumo de energía a fuego lento, según ASTM-F1785.	112
9.2.2	Resultados de la prueba a fuego lento.	114

9.3 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN	115
9.3.1 Resultados del Análisis	115
9.4 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA.....	117
9.4.1 Procedimiento general de determinación de la Incertidumbre en el reporte de resultado de pruebas, según ASTM –F1785.	117
9.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	118
10 CONCLUSIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	121
ANEXOS.....	123

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Actividades Productivas del Sector Industrial, Santander.....	23
Figura 2. Actividades Productivas del Sector Agroindustrial, Santander.	24
Figura 3. Esquema de producción centralizado con caldera y marmitas	25
Figura 4. Relación entre energía térmica y eléctrica –GWH/AÑO (izquierda), y el uso de la energía térmica-GWH/AÑO.....	28
Figura 5. Demanda de energía por uso de vapor en los subsectores industriales.	28
Figura 6. Sección de una caldera de baja temperatura (izquierda) y de dos calderas de condensación (derecha)	31
Figura 7. Marmita de vapor directo.	34
Figura 8. Partes principales de una marmita autogeneradora de vapor	35
Figura 9. Marmita Papin. El Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de España (MUNCYT).	39
Figura 10. Composición típica del Acero Inoxidable 304, según ASTM A240	44
Figura 11. Efecto de la temperatura de gases de combustión sobre el calor extraído	51

Figura 12. Conducción: Estado estacionario. Unidimensional (pared multicapas)	54
Figura 13. Dimensiones para transferencia de calor en cilindro largo.	55
Figura 14. Sistema de combustión del nuevo prototipo de marmita	69
Figura 15. Típica curva de operación de la válvula de gas de dos etapas White Rodgers 36J55-214	70
Figura 16. Encendido por piloto intermitente (izquierda), Horno con sistema HSI (derecha)	72
Figura 17. Operación de control del sistema de combustión.	73
Figura 18. Propuesta final de intercambiador para el nuevo prototipo de marmita	78
Figura 19. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo final.	86
Figura 20. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo escalado del primer prototipo.	87
Figura 21. Dimensiones para cabezas tipo standard flange según ASME	88
Figura 22. Algunos tipos aceptables de chaqueta.	91
Figura 23. Algunos tipos aceptables de los cierres de la chaqueta	92
Figura 24. Estilos de cooling element (Perforadas o con Aletas)	94
Figura 25. Rango de temperatura del transductor de presión con un “cooling element”. Cuando la temperatura máxima de operación del transductor es 85°C.	95

Figura 26. Diferentes modelos de cabezas para tanques	98
Figura 27. Proceso de fabricación de la chaqueta de vapor	100
Figura 28. Proceso de fabricación del Intercambiador de calor	101
Figura 29. Ensamblaje instrumentación de la marmita	101
Figura 30. Partes principales y elementos de control y seguridad de la marmita	103
Figura 31. Partes del módulo de adquisición de datos	104
Figura 32. Curva aproximada de la potencia de los quemadores para diferentes diámetros de inyectores	106
Figura 33. Efecto del volumen de agua (en el intercambiador de calor) en la eficiencia	107
Figura 34. Intercambio de calor en la marmita.....	108
Figura 35. Comparación eficiencia de calentamiento según datos publicados por Food Service Technology Center.....	112
Figura 36. Prueba de consumo de energía a fuego lento	114
Figura 37. Eficiencia de combustión vs Temperatura de Gas a la salida de la chimenea	116
Figura 38. Comparación de los resultados de simulación con los datos experimentales de la temperatura del producto vs tiempo de calentamiento.	119

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización de las Fábricas de Bocadillo en Moniquirá.....	27
Tabla 2. Tipos de cocción en medio acuoso.....	37
Tabla 3. Funciones de proceso de cocción.....	38
Tabla 4. Principales fabricante de marmitas autogeneradoras a nivel internacional	41
Tabla 5. Principales fabricantes de marmitas autogeneradoras en Colombia	43
Tabla 6. Comparación de Desempeño entre marmitas autogeneradoras.....	46
Tabla 7. Normatividad Internacional y Norma Técnica Colombiana	48
Tabla 8. Análisis de mejoras para el prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas natural.	60
Tabla 9. Requerimientos de Diseño orientado al usuario.	63
Tabla 10. Especificaciones del nuevo prototipo de marmita según ASTM 1602 ...	64
Tabla 11. Resultados obtenidos: pruebas de desempeño en laboratorio del primer prototipo.....	65
Tabla 12. Balance de masa para ingredientes en la formulación de un bocadillo .	67
Tabla 13. Características Válvula de gas seleccionada.....	70

Tabla 14. Diferentes modelos de intercambiador de calor en marmitas para el diseño del nuevo intercambiador de calor	75
Tabla 15. Características geométricas principales de cada diseño	77
Tabla 16. Dimensiones recipiente del producto	88
Tabla 17. Valores utilizados para el cálculo de espesores.	93
Tabla 18. Requerimientos del sensor-transmisor de presión	94
Tabla 19. Diámetro interior mínimo del conector de evacuación directa a través de fachada para artefactos a gas del Tipo B.1.	96
Tabla 21. Lista de componentes cuerpo marmita	102
Tabla 22. Lista de componentes de control y seguridad	102
Tabla 23. Lista de componentes tren de gas	103
Tabla 24. Instrumentación del módulo de adquisición	105
Tabla 25. Condiciones Atmosféricas y de Referencia.....	110
Tabla 26. Gas Suministrado	110
Tabla 27. Energía requerida	111
Tabla 28. Resultados de las pruebas de eficiencia.....	111
Tabla 29. Resumen de Características Metrológicas del Analizador de Gases...	115
Tabla 30. Valores del analizador de gases en a prueba 9	116

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Hoja de reporte de resultados.....	123
ANEXO B. Costos de producción de la marmita autogeneradora.....	125
ANEXO C. Certificación de la corporación CDT de GAS.....	127
ANEXO D. Operación del sistema de adquisición de datos utilizando el sistema embebido Beaglebone black.....	128
ANEXO E. Operación del sistema de control y adquisición de datos de ECOOK steam.....	136
ANEXO F. Nomenclatura del modelo de transferencia de calor.....	141
ANEXO G. Planos proyecto marmita.....	145

RESUMEN

TÍTULO: REINGENIERÍA APLICADA A UNA MARMITA DE TIPO AUTOGENERADORA DE VAPOR CONSTRUIDA POR LA CORPORACIÓN CDT DE GAS PARA EL SECTOR AGROINDUSTRIAL*

AUTOR: LEONARDO ENRIQUE RIVERA HERNÁNDEZ**

Palabras Claves: Reingeniería, cocción, marmita, eficiencia energética, vapor.

En el 2010 la corporación CDT de Gas desarrolló una marmita autogeneradora de vapor a gas natural, siendo una tecnología socialmente apropiada para la cadena productiva del bocadillo veleño y una alternativa que contribuye al desarrollo de la generación descentralizada frente a los sistemas de calentamiento centralizados tradicionales del sector.

Se detectaron mejoras en el prototipo a nivel de manufactura, en el sistema de control y seguridad, además aunque su eficiencia energética fue aceptable era posible aumentarla con el fin de disminuir los costos de operación.

Por tal razón en este proyecto se realizó la reingeniería de la marmita autogeneradora, donde se logró construir (con ayuda de manufactura local) un prototipo de 40 Gal de capacidad, teniendo en cuenta los requerimientos de control y seguridad de la norma ASTM F1602-02 y del código ASME de calderas y recipientes a presión y Normas Técnicas Colombianas aplicables, haciéndolo un prototipo apropiado para ser comercializado en todo el sector agroindustrial.

La nueva marmita alcanzó una eficiencia energética de $63,64 \pm 0,92$ % (valor muy cercano al state of de art) para una potencia nominal de 23 kW de acuerdo al procedimiento de evaluación ASTM F1785 del 2008, que corresponde a una alta eficiencia de acuerdo al benchmarking realizado FSTC de Estados Unidos. Además, se logró disminuir el exceso de aire de un 67% (primer prototipo) a 20% cumpliendo con las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera según la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. También se seleccionó una válvula de gas de apertura lenta de dos etapas y un control de ignición de superficie caliente lo que aumentó el nivel de fiabilidad de la marmita.

Este proyecto fue desarrollado por la Corporación CDT de Gas, la Universidad Industrial de Santander y financiado por COLCIENCIAS.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Julián Jaramillo. Co-director: Víctor Manrique. Corporación CDT de GAS.

ABSTRACT

TITLE: RE-ENGINEERING APPLIED TO A SELF-CONTAINED STEAM-JACKETED KETTLE, GAS-HEATED, BUILT BY CORPORATION “CDT DE GAS” FOR THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR*

AUTHOR: LEONARDO ENRIQUE RIVERA HERNÁNDEZ**

KEY WORDS: Re-engineering, cooking, steam jacketed kettle, energy efficiency, steam.

In 2010, corporation “CDT de Gas” developed a self-contained steam jacketed kettle, which it was a socially appropriate technology for the productive industry of “bocadillo Veleño” and an alternative that contributes to the development of the decentralized generation compared to the traditional centralized heating systems in the industry.

Improvements in the prototype at the level of manufacturing, in the system of control and security were detected; although its energy efficiency was acceptable, it was possible to increase it in order to reduce the costs of operation (cooking time).

For that reason, in this reengineering project the self-contained steam jacket kettle was developed, where a prototype of 40 Gallons was built (with the help of local manufacturing) taking into account the requirements of control and security of the policy ASTM F1602-02 and ASME code of boilers and pressure vessels and applicable Colombian Technical Standards, which make a suitable prototype of being marketed in all the agro industrial sector.

The new jacketed-kettle reached an energy efficiency of $63,64 \pm 0,92$ % (a very close value to state of the art) for a nominal power of 23 kW, according to the procedure of evaluation ASTM F1785, 2008, which corresponds to a high efficiency as benchmarking carried out FSTC of The United States.

In addition, it was possible to reduce the excess of air from a 67% (the first prototype) to 20% in compliance with the standards and rules of emission of pollutants into the atmosphere, according to the Resolution 909, 2008 of the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development. It was also selected a gas valve opening slow of two stages and a control of ignition of hot surface, which increased the level of reliability of the jacketed-kettle.

This project was developed by corporation “CDT de GAS”, Universidad Industrial de Santander and funded by COLCIENCIAS.

* Degree Project

** Faculty of physical-mechanic engineering. Career: Mechanical Engineering. Director Ing. Julián Jaramillo, Co-director: Víctor José Manrique Moreno. Corporation CDT de GAS.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el diagnóstico del Plan Indicativo PROURE 2010-2015, las mayores ineficiencias en la industria colombiana están asociadas a la obsolescencia tecnológica de los equipos térmicos y eléctricos. Principalmente calderas y motores de baja eficiencia, al uso de sistemas de calentamiento indirecto en los procesos, y a la falta de buenas prácticas operacionales y de gestión de energía. En relación a esta problemática se han desarrollado numerosos mecanismos e incentivos para promover la eficiencia energética, incluyendo la optimización de procesos de combustión y del uso de calderas.

Recientemente la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) con Colciencias, han patrocinado estudios de caracterización de los consumos energéticos de diferentes procesos, usos y equipos en sectores manufactureros, en donde una de las líneas de acción tomadas, planteó la necesidad de implementar sistemas de calentamiento descentralizado a gas natural.

Como parte de su actividad misional, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas con el patrocinio de Colciencias, y el apoyo de la Universidad Industrial de Santander -UIS busca contribuir al incremento de la competitividad y sostenibilidad de sus sectores de interés, mediante proyectos de desarrollo tecnológico e innovación, para la promoción y el uso eficiente del gas natural; por tal razón el CDT de GAS promueve la tecnología de marmitas autogeneradoras como aporte al desarrollo de la generación descentralizada, lo que es de gran aporte para las metas planteadas por la UPME.

El prototipo de marmita desarrollada por el CDT de GAS está dirigido principalmente a un sector comercial que requiere una gestión eficiente de la energía en sus procesos, debido al uso intensivo de calor para calentamiento, además de la necesidad de un proceso de cocción a temperatura controlada para la obtención de

un producto con los requerimientos pedidos como el olor, sabor y concentración. Estas industrias donde puede ser requerida la marmita autogeneradora de vapor son las Pequeñas y medianas empresas de procesamiento de dulces semielaborados de fruta y leche, además de cocinas en hoteles, cárceles, restaurantes escolares, universitarios y comunales, en donde se requiere el uso de una mínima cantidad de marmitas.

En el primer prototipo se detectaron fallas que no permitieron que la tecnología cumpliera con todos los requerimientos para ser comercializados en los sectores de interés. Por tal razón se realizó la reingeniería a este prototipo en busca de mejoras de manufactura, en el sistema de control y seguridad, y el aumento de eficiencia por medio del dimensionamiento adecuado de la potencia del sistema, el volumen óptimo de la cámara de combustión y de vapor, así como la modificación del intercambiador de calor.

En la primera parte de este proyecto se documenta los antecedentes que incentivaron a la corporación CDT de Gas en desarrollar la tecnología de marmitas autogeneradoras de vapor, así como los estudios realizados por UPME y COLCIENCIAS, que muestran la importancia de realizar las respectivas mejoras en el prototipo como contribución a una gran parte del sector agroindustrial. Por otra parte en el capítulo 3 se establecen las diferencias de las marmitas generadoras de vapor y de vapor directo, así como el propósito de estas en la industria alimenticia y de bebidas.

En el capítulo 4 se presenta un resumen del estado del arte de las patentes de marmitas autogeneradoras de vapor, y sus principales fabricantes a nivel nacional e internacional, para continuar en el capítulo 5 con las características técnicas de una marmita autogeneradora de vapor, desde su funcionamiento hasta su normativa técnica aplicable.

En la segunda parte del proyecto se especifican los parámetros para evaluar el desempeño de una marmita y el efecto de la eficiencia de combustión y de

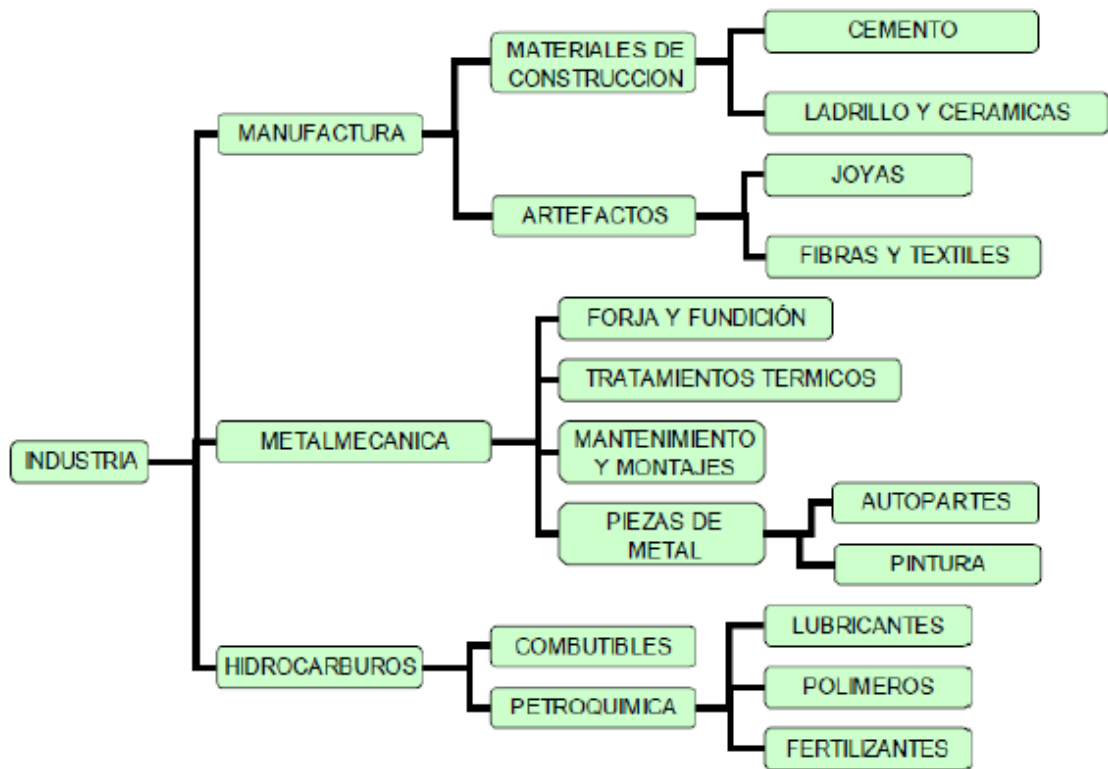
transferencia de calor en esta evaluación (capítulo 6). En el capítulo 7 se presenta la reingeniería de la marmita, donde primero se realiza el análisis de mejoras para el prototipo, para luego pasar al proceso de diseño de la nueva marmita, teniendo en cuenta los requerimientos de diseño y la normatividad técnica aplicada.

En el capítulo 8 se presenta un resumen del proceso de manufactura llevado a cabo en OyN ingenierías (metalmecánica local), el ensamblaje de los instrumentos en el panel de control y sistema de combustión, y el módulo de adquisición de datos utilizado en las pruebas. Para finalmente documentar las pruebas de desempeño según la Norma ASTM F1785.

1 ANTECEDENTES

En el año 2008 la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas junto con COLCIENCIAS, realizó un estudio de necesidades en materia de fluidos y energía del sector industrial de Santander. Este análisis permitió identificar los sectores que poseen una alta demanda energética en sus procesos, principalmente del sector agroindustrial e industrial (manufactura, metalmecánica e hidrocarburos).

Figura 1. Actividades Productivas del Sector Industrial, Santander.



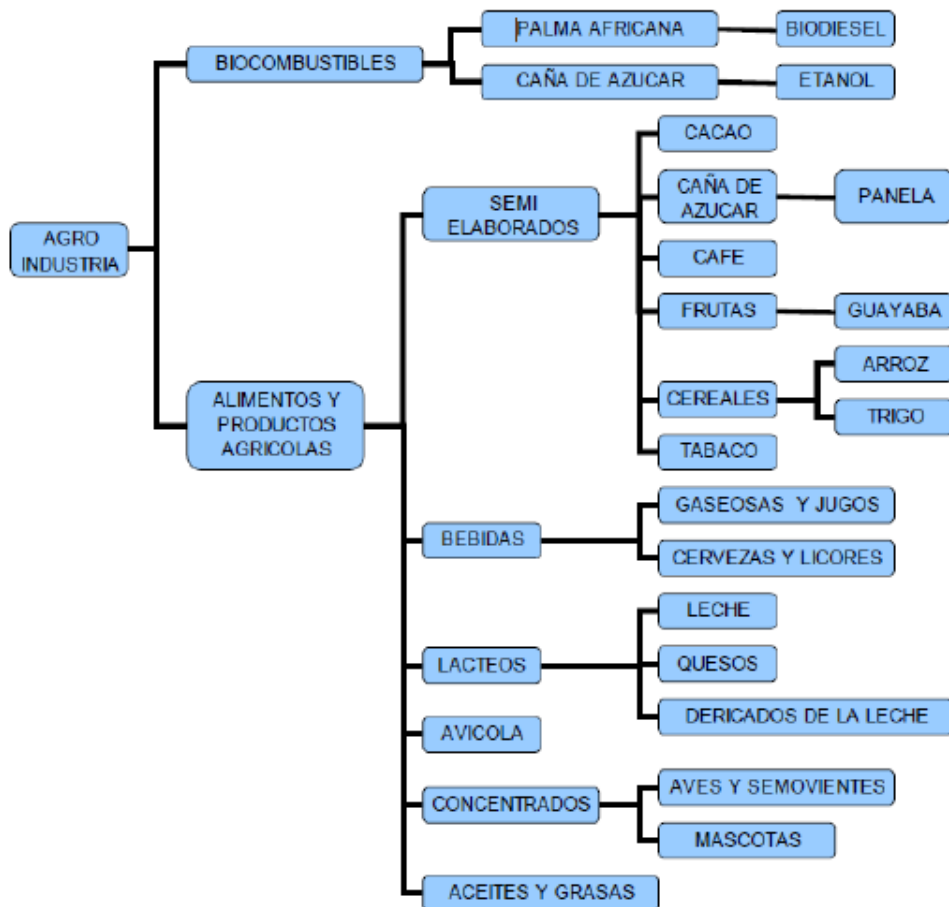
Fuente: CDT. Estudio de Necesidades Regionales en Fluidos y Energía

En el sector agroindustrial y de alimentos se identificaron necesidades en materia de energía y fluidos en las cadenas productivas del Bocado Veleño y en la Panela, actividades de gran importancia en el contexto socioeconómico de la Región. Además, *“estos sectores son los que tienen las mayores barreras culturales,*

económicas e institucionales para la penetración de tecnologías energéticamente eficientes”¹.

A partir de este análisis se identificó la necesidad específica de este sector de implementar estrategias de producción más limpia y eficiente, razón por la cual la Corporación CDT de Gas empezó un camino en busca de posibles soluciones a esta problemática, en donde afortunadamente surgió la oportunidad de incidir en forma directa en esta industria.

Figura 2. Actividades Productivas del Sector Agroindustrial, Santander.



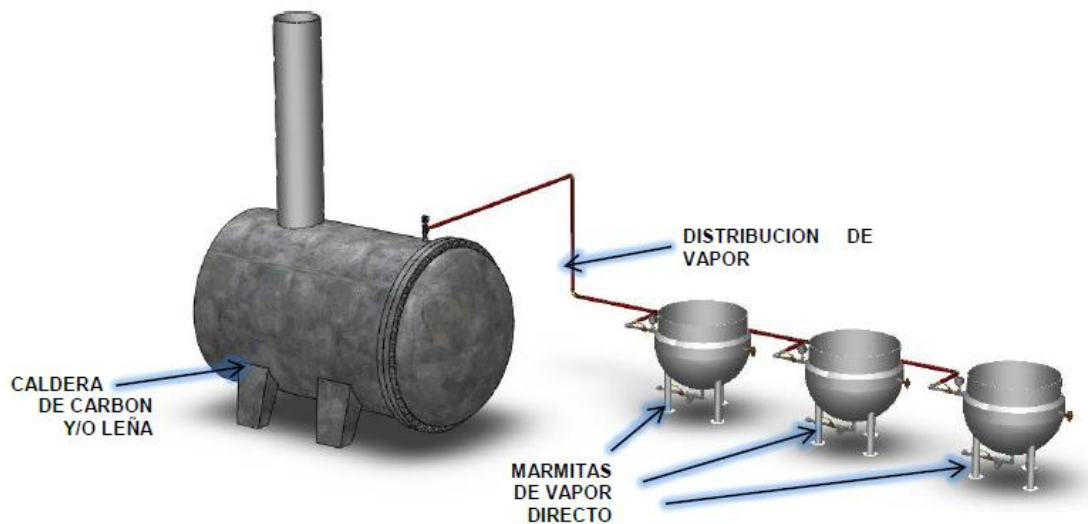
Fuente: CDT de GAS. Estudio de Necesidades Regionales en Fluidos y Energía

¹ Congreso de la República de Colombia. 2001. Ley 697 de 2001. Bogotá: Congreso de la República.

La cocción de la pulpa de guayaba es una de las etapas de la cadena productiva del bocadillo veleño que demanda considerable energía térmica, y fue en este punto del proceso donde la corporación intervino mediante el desarrollo de una marmita autogeneradora de vapor como alternativa para la reconversión tecnológica de esta industria. Proyecto, el cual fue desarrollado en convenio con la Universidad Industrial de Santander, la Corporación CDT de GAS, el Centro de Desarrollo Productivo de Alimentos (CDPA), el Centro de Investigación para el Mejoramiento Productivo de la Panela (CIMPA) de CORPOICA, la Asociación ASOVELEÑOS y financiado por el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación COLCIENCIAS.

En medio de este proyecto se realizó un diagnóstico energético del sector, en donde se evidencio características comunes entre la mayoría de las fábricas de producción de bocadillo, presentadas a continuación²:

Figura 3. Esquema de producción centralizado con caldera y marmitas



Fuente: MANRIQUE, Víctor. Proyecto de grado³.

² MANRIQUE, Víctor José. Diseño y construcción de una marmita autogeneradora de vapor, a gas natural, como alternativa para la reconversión tecnológica de la industria del bocadillo en Vélez, Santander. Trabajo de Grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. 2010. p. 48-51

³ Ibíd.,p.49.

- Las fábricas presentan un esquema de generación de calor centralizado el cual consta de una caldera principal (se obtiene vapor saturado entre 50-70 psi), varias marmitas de vapor directo, tuberías y válvulas reguladoras requeridas para la distribución del vapor. Son pocas las fábricas donde hay una recuperación del líquido condensado.
- Las calderas utilizadas son de tipo Piro-tubulares, por lo general son adecuadas y/o re-potenciadas a partir de calderas dadas de baja en otros sectores, o de antiguas locomotoras de vapor.
- El carbón y leña de arrayán son los combustibles más utilizados pero semillas de guayaba, llantas usadas, entre otros elementos son ocasionalmente usado; todos estos combustibles sólidos son almacenados a la intemperie y se queman en condiciones de humedad y granulometría que no garantizan la mejor eficiencia de la combustión.
- La mayoría de las fábricas desconocen el desempeño energético real de la caldera, y no realizan ajuste de la combustión.
- La tuberías de distribución de vapor por lo general no se encuentran aisladas
- El control de la caldera (suministro de combustible, suministro de agua, regulación del tiro, control de presión, etc.) se realiza manual.
- Ninguna fábrica emplea medidas de final de tubo para monitorear, o reducir sus emisiones.
- La mayoría de las calderas están sobredimensionadas para las demandas reales de vapor para el proceso⁴. Como se puede observar (la tabla 1) existen fábricas que operan con una caldera del doble de capacidad instalada respecto a otras fábricas de similar producción.

⁴ BURGOS, Natalia y ZARATE, Karen. Diseño conceptual del proceso productivo de dulces de guayaba utilizando gas natural en el municipio de Moniquirá. Trabajo de Grado Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Químicas. 2006. p. 49

Tabla 1. Caracterización de las Fábricas de Bocadillo en Moniquirá

Nombre	Pailas	Tipo de caldera	Capacidad caldera (Bhp)	Mantenimiento correctivo	Años uso	Adquisición
La Selección	4	Pirotubular	30	Cada dos años	25	De segunda
San Fernando	4	Pirotubular	30	Cada año	6	Nueva
La Calidad	4	Pirotubular	30	Cada año	25	De segunda
Doña Guayaba	4	Pirotubular	12	Cada seis meses	50	De segunda
La Campana	3	Pirotubular	15	Cada año	20	De segunda
Guayabetal	10	Pirotubular	60	Cada año	15	Nueva
JN	5	Pirotubular	40	Cada año	8	De segunda
El Cóndor	4	Pirotubular	30	Cada año	10	De segunda
La Ricaurte	3	Pirotubular	15	Cada año	3	De segunda

Fuente: BURGOS, Natalia y ZARATE, Karen. Proyecto de grado⁵

Gracias al análisis del sector tanto económico, social y ambiental llevado a cabo en el proyecto anteriormente mencionado, se desarrolló la tecnología de la marmita autogeneradora de vapor como una alternativa energéticamente eficiente para la industria del bocadillo. El desempeño energético del prototipo construido logró una eficiencia de calentamiento del 53% (+-1,78)⁶, el cual es un excelente resultado teniendo en cuenta que un valor óptimo para este tipo de marmitas es de aproximadamente el 60%.

Con los buenos resultados energéticos, obtenidos en este prototipo evaluado con la norma ASTM-F1785, la Corporación CDT de Gas decidió continuar el desarrollo de este tipo de marmitas para realizar mejoras del sistema de control operacional y de encendido, así como mejorar su proceso de manufactura para evitar fugas en la marmita, y seleccionar los espesores de lámina adecuados; para el caso de este proyecto se planteó como objetivo principal desarrollar un prototipo que alcanzara un desempeño energético similar al state-of-art internacional⁷ (65% reportado por los fabricantes).

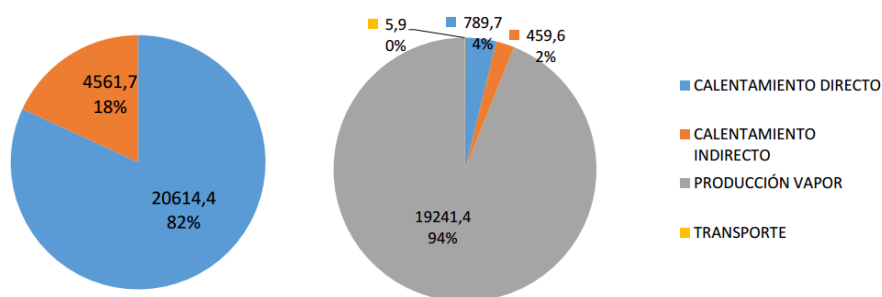
⁵ *Ibíd.*, p.57

⁶ MANRIQUE. *Op. cit.*, p. 178.

⁷ [Citado el 05 de mayo de 2015] Disponible en < [www. Unifiedbrands.net/products/groen/steam-jacketed-kettles/](http://www.Unifiedbrands.net/products/groen/steam-jacketed-kettles/) >

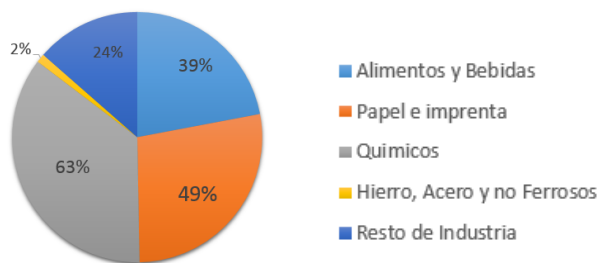
Por otro lado la necesidad de esta tecnología se justifica en la temática de eficiencia energética en los procesos industriales estudiados por COLCIENCIA; Desde el 2005 esta entidad inició un plan enfocado al desarrollo de novedosas e innovadoras tecnologías para optimizar los procesos energéticos en busca del aumento de la productividad, disminuir costes, promover la sostenibilidad económica y competitividad nacional.

Figura 4. Relación entre energía térmica y eléctrica –GWH/AÑO (izquierda), y el uso de la energía térmica-GWH/AÑO



Fuente, UPME, 2014.

Figura 5. Demanda de energía por uso de vapor en los subsectores industriales.



Fuente, UPME, 2015.

En el estudio realizado por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía-GASU, se puede detectar el gran apoderamiento de la energía térmica, con un aprovechamiento de más del 80%, principalmente para la generación de vapor en los sectores industriales, con un 39 % en el uso del vapor

para la industria de alimentos y bebidas⁸, lo que verifica la importancia del estudio de este sector industrial para su desarrollo.

COLCIENCIAS en el estudio “Determinación del potencial de reducción del consumo energético en los subsectores manufactureros código CIU 10 a 18 en Colombia” y “Determinación y priorización de alternativas de eficiencia energética para los subsectores manufactureros código CIU19 a 31 en Colombia” determinó las siguientes líneas de acciones, consideradas prioritarias para mejorar la eficiencia energética en el sector industrial⁹:

- Incremento de la eficiencia energética en calderas pirotubulares con combustibles gaseosos, principalmente de gas natural.
- Incremento de la eficiencia en calderas que utilizan carbón y biomasa.
- Implementación de sistemas de calentamiento descentralizado, lo cual puede llevar a mejorar ostensiblemente el uso combustibles gaseosos, principalmente del gas natural.
- Sustitución de motores eléctricos mediante MEPS (“Minimum Energy Performance Standard”).

Teniendo en cuenta estos lineamientos la UPME proyectó mejoras significativas; por ejemplo en la demanda del uso del gas natural en el sector industrial se presenta un aumento del 0.38% al 1.49% entre el 2015-2018, y una meta total del 7% en el sector industrial Colombiano en este mismo periodo de tiempo

Por tal razón, teniendo en cuenta que en estos últimos años el sector agroindustrial alimentario nacional ha evolucionado exponencialmente y que su aporte ha sido de

⁸ COLCIENCIAS. Alcance de la convocatoria eficiencia térmica en el sector productivo Colombiano. p. 2. [20 de abril de 2015]. Disponible en <http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/documents/anexo_2_alcance_convocatoria_eficiencia_termicax.pdf>

⁹ COLCIENCIAS. Op.cit., p 4.

vital importancia para la generación de empleo y la economía en el país, en donde se destacan las cadenas del sector de la industria alimentaria como la molinería, productos lácteos, grasas y aceites, chocolaterías, charcuterías y dulcerías, entre otros, que ha presentado un desarrollo continuo; anexando que este sector se ha modernizado al introducir mejores prácticas de manufactura y la introducción de nuevas líneas de productos y paquetes destinados a llegar a los mercados internacionales, este nuevo prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas va dirigido a toda la industria de alimentos y bebidas en donde la cocción de sus productos hace parte de sus procesos. Además la Corporación CDT de GAS busca el desarrollo de la generación descentralizada, que se basa en que la fuente de energía y el lugar de uso final deben estar lo más próximo posible para reducir las pérdidas energéticas causadas por la distribución de vapor como apoyo al cumplimiento de las expectativas a través de la tercera línea de acción planteada por COLCIENCIA para el 2018.

El campo de aplicación para este tipo de tecnología son principalmente los establecimientos donde solo requieren el uso de una a tres marmitas para sus procesos de cocción, por ejemplo algunos servicios institucionales y comerciales como hoteles, batallones, cárceles, entre otros, los cuales abarcan una gran parte de posibles compradores del modelo. En este sector no es conveniente el uso de una marmita a vapor directo debido a que esta requiere de una caldera, lo cual no sería justificable tal abastecimiento de vapor, espacio requerido y sus costos en infraestructura y mantenimiento.

El nuevo prototipo de marmita también abarca las cadenas productivas alimentarias como los derivados de lácteos o dulces de fruta que a pesar de que no utilizan una sola marmita para su producción, como ya se nombró anteriormente la mayoría actualmente labora con calderas obtenidas de las locomotoras a vapor en donde operan con carbón o biomasa, están sobredimensionadas para este proceso, y no poseen la tecnología que permitan controlar el abastecimiento de vapor en épocas con bajas cosechas.

Es importante aclarar que la marmita autogeneradora de vapor no se presenta como la mejor o la única alternativa para cubrir las necesidades presentes en el sector, ya que continuar con un sistema centralizado pero utilizando una caldera de alta eficiencia también es una óptima alternativa. Desde la crisis energética producida por el petróleo en la década de los 70, se originó la necesidad de crear calderas que mejorasen su rendimiento¹⁰, con este propósito, de adaptar la temperatura de funcionamiento a las necesidades de la instalación, evitando pérdidas innecesarias que se producían al alcanzarse temperaturas muy elevadas, se desarrollaron nuevas tecnologías que permitían trabajar a bajas temperaturas de retorno sin riesgo de condensaciones ácidas, estas se denominan calderas de baja temperatura. Por otra parte, para aprovechar el calor latente que se desprende en el proceso de cambio de estado del vapor de agua durante la combustión, se han desarrollado las calderas de condensación.

Figura 6. Sección de una caldera de baja temperatura (izquierda) y de dos calderas de condensación (derecha)



Fuente: FENERCOM, 2010.

¹⁰ Soluciones energéticamente eficiente en la edificación. Tecnologías de calefacción de alta eficiencia energética, capítulo 10. p.173. FENERCOM 2010. Disponible en <<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Soluciones-energeticamente-eficientes-en-la-edificacion-fenercom-2010.pdf>>

Esta alternativa es viable a pesar de sus costos iniciales debido a que logran un ahorro energético de aproximadamente un 15% para las calderas de baja temperatura respecto a las calderas convencionales, y un aumento del 15% para las calderas de condensación con respecto a las de baja temperatura.

En consecuencia, no es correcto afirmar cuál sistema energético es mejor (centralizado o descentralizado para el caso de marmitas a vapor) ya que existen una variedad de factores que influyen en la selección de una u otra alternativa, tales como costos iniciales, ahorro energético, consumo, espacio disponible, producción de la empresa (número de marmitas), tiempos de producción (intermitentes o continuos), costos de mantenimientos, entre otros; Sino que se puede afirmar que cada alternativa es adecuada según el escenario que se plantee teniendo en cuenta los factores ya mencionados.

Este proyecto fue desarrollado teniendo en cuenta que para que la marmita autogeneradora de vapor a gas pueda ser comercializada se deben mejorar falencias tanto operativas como en eficiencia energética que el modelo actual presenta; desde el punto de vista técnico se identificaron potenciales mejoras en el desempeño a partir de un incremento de la potencia el cual permite un mejor tiempo de cocción, sin disminuir su eficiencia, modificación de la geometría del intercambiador de calor, incorporación de un sistema de control de presión y temperatura, y entre otras modificaciones en busca de un nuevo equipo más ajustado a las condiciones operativas del proceso, a normativa y sostenibilidad.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander en el propósito de formar profesionales integrales con capacidades de desarrollo tecnológico e innovación, mediante la reingeniería de un prototipo de marmita tipo autogeneradora de vapor a gas natural, para su mejoramiento energético y operacional, para contribuir al desarrollo de diversos sectores comerciales y agroindustriales del país.

2.2 Objetivo específico

- Mejorar el desempeño operacional de la marmita tipo autogeneradora de vapor a gas construida por la corporación CDT de Gas, modificando el sistema de encendido y supervisión de llama e incorporando un sistema de control de presión y temperatura (la marmita debe trabajar en un rango de 25 a 50 psig).
- Modificar el intercambiador de calor y cámara de combustión del prototipo actual para mejorar la eficiencia energética de la marmita, teniendo en cuenta factores como área de transferencia de calor, área de entrada y escape de los gases de combustión, entre otros.
- Construir un prototipo de marmita autogeneradora de vapor de 40 galones de capacidad con las diferentes modificaciones decididas.
- Evaluar el desempeño energético y operativo de la marmita, mediante la realización de pruebas de laboratorio de acuerdo con ASTM F 1785.

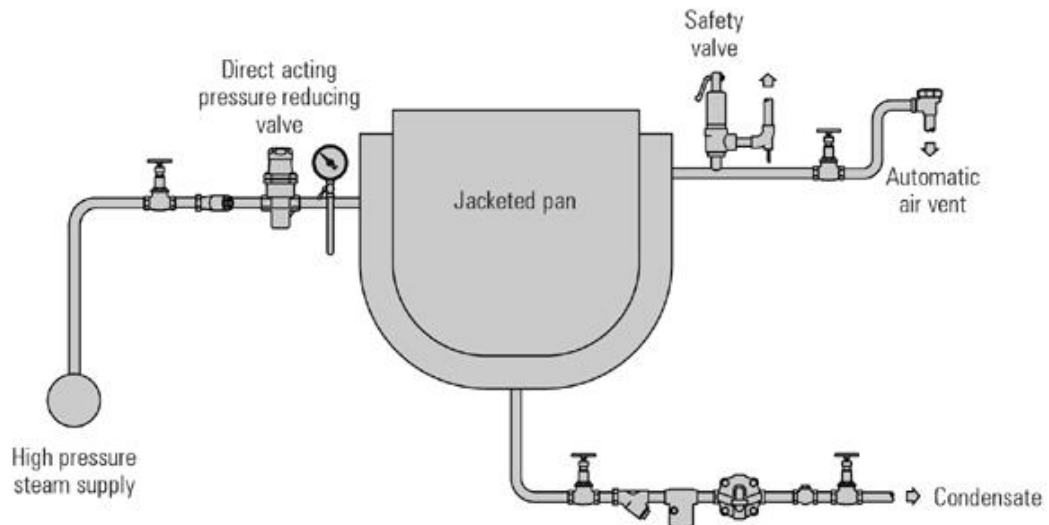
3 MARMITAS

La marmita es una versión mejorada de la olla convencional utilizada para la cocción de grandes cantidades de alimentos, se utilizan a menudo para hervir salsas, pastas, y en las industrias productoras de dulces a base de frutas, lácteos y panela. La marmita está rodeada por una pared exterior (chaqueta de vapor) que contiene vapor de agua y normalmente se extiende desde el fondo de la marmita hasta cubrir la mitad o dos tercios del recipiente (del producto a procesar). La circulación de vapor en el interior de la chaqueta proporciona un calentamiento rápido y equilibrado desde el vapor de agua hasta el producto. La presión del vapor, que puede estar en el rango de 1-50 psig (7-345kPa), determina la temperatura máxima de la marmita.

3.1 TIPOS DE MARMITAS A GAS NATURAL

Existen dos tipos de marmita según su funcionamiento, la de vapor directo y la autogeneradora, ambas utilizan vapor dentro de la chaqueta, el cual transfiere la mayor cantidad de calor al interior de la marmita por calor latente.

Figura 7. Marmita de vapor directo.

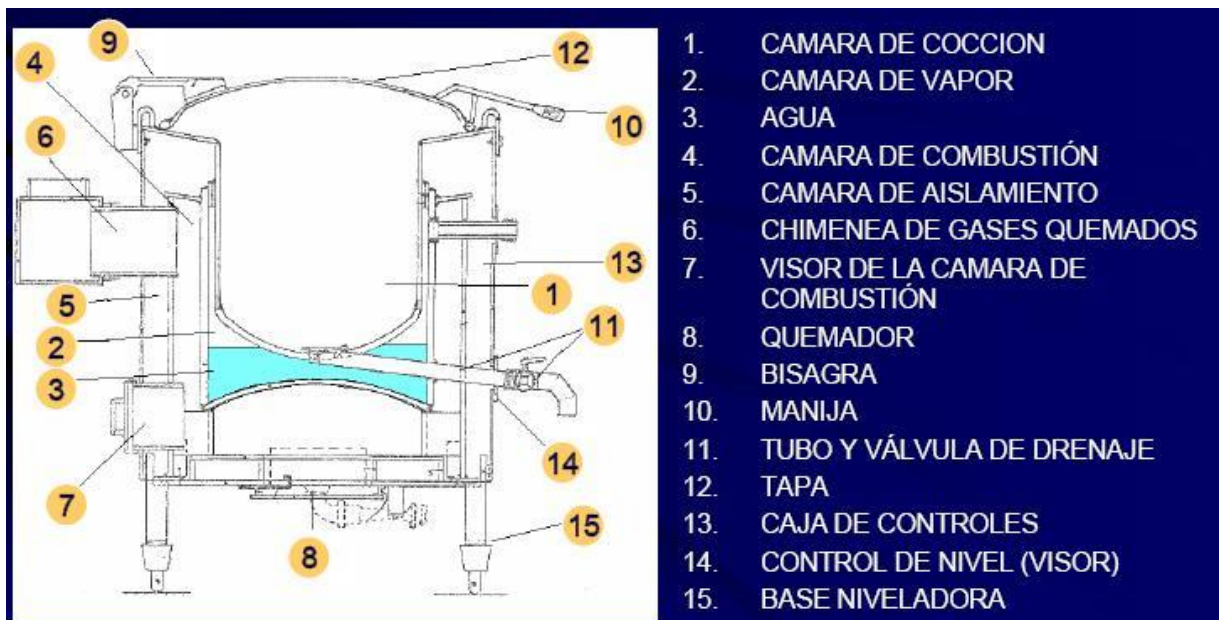


Fuente: Diseño de sistemas de fluidos. Spiraxsarco.p.57.

3.1.1 Vapor directo. La fuente de vapor es una caldera y es conducido a través de tuberías. Una de las ventajas de este diseño es que la estructura de la marmita es sencilla ya que básicamente consta de un recipiente, la chaqueta de vapor, la entrada y salida de vapor, pero en contra se tiene que requiere de una caldera, aumentando costos de mantenimiento e infraestructura.

3.1.2 Autogeneradora. Es un sistema de vapor cerrado. La chaqueta está llena de agua y el calor se suministra mediante resistencias eléctricas o quemadores de gas contenidos en la base de la marmita. Algunas de las ventajas de este diseño es que elimina la necesidad de la caldera, lo que por consiguiente elimina los equipos adicionales que esta requiere (tubería de distribución de vapor, retorno de condensado y trampas de vapor) y menor infraestructura, pero en contra se aumenta la complejidad del diseño de la marmita y costos de fabricación.

Figura 8. Partes principales de una marmita autogeneradora de vapor



Fuente: PALLOMARO

3.2 COCCIÓN CON MARMITAS

Para conocer la importancia de la utilización de marmitas en la industria alimentaria a nivel mundial, es necesario conocer el contexto de los métodos de cocción como técnicas culinarias. A continuación se presenta un resumen donde se exponen las formas más comunes de cocción en el mundo gastronómico.

3.2.1 Proceso de cocción. La cocción es una técnica culinaria que desde el punto de vista de la termodinámica significa un tratamiento térmico del alimento (generalmente crudo) donde el calor incrementa la movilidad de las moléculas y le aporta la energía suficiente para que reaccionen entre ellas y se transformen. Hay muchos alimentos que se pueden consumir crudos y otros que necesitan una modificación química para hacerlos digestivos, es claro que por medio de la cocción los alimentos se pueden hacer más sabrosos y apetitosos, hay que tener claro que al realizar este proceso el aspecto y textura de los alimentos cambia pero además aumenta su garantía sanitaria ya que el calor destruye casi todos los microorganismos presente en el alimento a procesar.

3.2.2 Métodos de cocción según el medio en el que se realiza. Podemos distinguir los métodos de cocción por el medio en el que se realiza: Cocción en medio seco, cocción en medio acuosa, cocción en medio graso y cocción mixta o combinada (agua y grasa). Para el estudio de la marmita nos interesa exclusivamente el método de cocción por medio acuoso ya que es en este donde se encuentra el proceso de cocción que realiza una marmita.

3.2.2.1 Cocción en medio acuoso. En esta técnica de cocción se emplea un fluido acuoso como medio de transferencia de calor para el tratamiento térmico del alimento. Para ello, el alimento toma contacto con el agua, caldo corto, jarabe o, incluso, vapor de agua. La diversidad del medio acuoso elegido tendrá su reflejo y consecuencias prácticas en los mecanismos de transferencias de energía y de masa.

Tabla 2. Tipos de cocción en medio acuoso

Cocción en medio acuoso	
Escaldar o Blanquear	Es una cocción incompleta realizada a un alimento, el cual recibe el efecto térmico del agua hirviendo pero durante un muy corto periodo de tiempo, la temperatura que alcanza el agua no supera el punto de ebullición.
Hervir	Es un proceso que implica la cocción del alimento por inmersión en agua o en caldo en ebullición durante un cierto tiempo que viene determinado por la calidad y volumen de los alimentos.
Cocción en olla a presión	Se trata de cocer en una olla hermética de presión a temperatura aproximada de 105°C a 120°C. Este método reduce los tiempos de cocción gracias al aumento de temperatura y presión.
Escalfar	Es la cocción de un alimento en un líquido, justamente por debajo de su punto de ebullición, el fin por el cual se realiza este proceso es para poder retirar la piel del alimento sin que haya una cocción interna del mismo.
Cocción al vapor directo	Consiste en cocinar los alimentos a través del vapor del medio líquido (agua), sin que éstos entren en contacto con él. Para ello, los ingredientes se colocan en un recipiente tipo rejilla o perforado suspendido en una cazuela, olla o similar que contiene el agua que se lleva a ebullición. Con esta técnica, los vapores que ascienden al hervir el líquido, cuecen los alimentos, de forma lenta pero sin dilución de los nutrientes
Cocción al vapor indirecto	Consiste en cocinar en un recipiente de doble pared, por la cual circula vapor u otro fluido térmico, con el objetivo de un mejor control de la temperatura a diferencia de cuando se cocina a fuego directo.

3.2.3 Funciones del proceso de cocción. La modificación de los alimentos para hacerlos más apetecibles es la función principal de la cocción. Para que esto ocurra se deben dar una serie de particularidades que hacen que el alimento procesado sea agradable a los sentidos.

Tabla 3. Funciones de proceso de cocción

Funciones proceso de cocción	
Modificación de los componentes	Se modifican los componentes bioquímicos y físicos de los alimentos, a través de uno o varios procesos como ablandamiento, coagulación, hinchamiento o disolución. Por ejemplo en el caso de la cocción de verduras se puede conseguir la destrucción de la pectina o del almidón, facilitando la digestión y que el alimento se ablande.
Transformación externa de producto	Coloración: Se produce en los gratinados, asados y glaseados. Hinchamiento: Como el que ocurre en panes, soufflés y bollería. Reducción o extracción de los jugos y principios nutritivos.
Desarrollo del sabor y el aroma	En general la cocción desarrolla los sabores, aunque en los sabores ácidos y amargos es posible que se atenúen. Para la modificación, tanto del sabor como el olor se disponen diversas técnicas de cocción en donde se puede encontrar la cocción a vapor.
Destrucción de elementos nocivos	Esta es la función más importante desde el punto de vista de la salud ya que gracias al calor se consigue la destrucción de prácticamente todos los agentes causales de enfermedades que se encuentran en los alimentos crudos.

4 ESTADO DEL ARTE: MARMITAS AUTOGENERADORAS DE VAPOR

“El mayor aporte del siglo XVII a la Tecnología de los Alimentos es posiblemente el desarrollo por el físico inventor francés Papin de su famosa marmita hecha en bronce (y especialmente de su eficiente válvula de seguridad)”¹¹, es probable que se utilizara con anterioridad con algún otro propósito pero fue Papin quien la empleó por primera vez para controlar la presión del vapor con el objeto de estudiar los efectos de la producción de vapor en recipientes cerrados.

Figura 9. Marmita Papin. El Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de España (MUNCYT).



Fuente: MUNCYT

Las marmitas a vapor han sobrevivido a cambios tecnológicos desde su invención, actualmente, son empleadas para preparar grandes cantidades de productos alimenticios, como salsas, vegetales, carnes y bebidas de una forma más eficiente. El vapor se introduce en la pared exterior de la marmita, que a su vez, calienta la pared interior. De esta forma, el contenido dentro de la pared es cocido al vapor. Existen diferentes tipos de marmitas en la actualidad, marmitas de aceite, de vapor,

¹¹ CALVO, Miguel. La ciencia y la tecnología de los alimentos. Algunas notas sobre su desarrollo histórico. En: Revista VIRTUAL. Algunas operaciones unitarias aplicadas a la industria de alimentos, p. 21. 01 de octubre de 2004. Disponible en < <http://www.revistavirtualpro.com/revista/algunas-operaciones-unitarias-aplicadas-a-la-industria-de-alimentos>>

para utilizar con caldera, de fuego directo, de serpentín y autogeneradora de vapor a gas. De todas, la mejor por su fácil mantenimiento y su eficiencia, además de la larga vida útil, es ésta última.

Alfred Groen es considerado en la actualidad el pionero de las marmitas a vapor¹², en 1890, empezó un negocio de fabricación de tanques y reparación de equipos de cervecería. Bajo el nombre de *Unified Brands*, Groen producía marmitas y recipientes a presión para la industria del procesamiento, así como equipos de cocina para la milicia, Groen se hizo muy conocida por la calidad e innovación en sus productos. Durante la Segunda Guerra Mundial, el gobierno de los Estados Unidos ordenó 100 marmitas a vapor para sus barcos. Después de la guerra, Groen se enfocó en la industria alimenticia, Groen creó marmitas a partir de acero inoxidable (puesto que el cobre era una fuente muy escasa en ese momento), actualmente las marmitas Groen producen su propio vapor, lo que ha hecho posible cocer alimentos mucho más rápido que antes.

4.1 DESARROLLO A NIVEL INTERNACIONAL

Unified Brands y Cleveland Range, son actualmente los fabricantes de marmitas autogeneradoras de vapor más importantes. Unified Brands, fue creado cuando Groen Co, Avtec Corp. (que desarrolló sistemas de ventilación y aire acondicionado) y Randell Co. (fabricante de sistemas de refrigeración), se fusionaron. Unified Brands ofrece tres tipos de marmitas a vapor: vapor directo, eléctricas y a gas. Por su parte, Cleveland Range es parte de Welbilt, un fabricante global de equipos para la industria alimenticia. Empezó actividades cerca de 1840 en Ohio y creó su primera línea de marmitas a vapor en 1982. Cleveland, también ofrece tres tipos de equipos: marmitas eléctricas autogeneradoras de vapor, de vapor directo y mezcladoras.

¹² Rapids wholesale. *A brief history of steam jacketed kettles*. [Citado el 12 de Mayo 2015]
Disponble en <<http://rapidswholesale.com/commercial-kitchen-equipment/commercial-cooking-equipment/steam-jacketed-kettle-convection-steamer.html>>

Fabricantes a nivel mundial, han diseñado equipos de muy alta eficiencia en su clase, llegando a 65% en cuanto a entrega térmica al producto. Entre ellos se encuentran compañías como las ya mencionadas Unified Brands, Cleveland Range, y otras como Vulcan y Electrolux de Estados Unidos, además de Fagor y Firex en Europa.

Tabla 4. Principales fabricante de marmitas autogeneradoras a nivel internacional

Fabricantes de marmitas a nivel internacional		
 <p>UNIFIED BRANDS GROEN (USA)</p>	<p>Es una empresa líder en la industria de equipos para servicio de alimentos. Los principales modelos de marmitas autogeneradoras a gas son de la línea AH y DH, con eficiencias del 58% hasta el 65%.</p>	
 <p>CLEVELAND RANGE (USA)</p>	<p>Es un fabricante especializado en el diseño de equipos de cocción al vapor. Sus principales modelos son las marmitas KGL autogeneradoras a gas, que presentan eficiencias de 65%</p>	
 <p>VULCAN EQUIPMENT (USA)</p>	<p>Muy conocida por la calidad y eficiencia de sus equipos. Trabaja en investigación y desarrollo tecnológico. Fabrica, sobre todo, marmitas autogeneradoras a gas del tipo fijas.</p>	



FIREX
(Italia)

Tecnología italiana al servicio de la cocina y la hostelería, se funda en 1989 y desde entonces ha cosechado un éxito notable en el mercado italiano, europeo y mundial de los equipos profesionales para la cocina y la hostelería.



Fagor Industrial es el mayor fabricante de maquinaria de hostelería y restauración colectiva de España. Marmitas gama 900 con eficiencias de 60%.



4.2 DESARROLLO A NIVEL NACIONAL

La industria de la cocción de alimentos en Colombia, sufrió un cambio importante desde la era de la revolución industrial con la llegada de las marmitas a vapor. Desde entonces, son utilizadas en la industria alimenticia. Actualmente, se han venido generando grandes avances en el campo, a partir del desarrollo de prototipos. Como ejemplo de ello, en el año 2009, el grupo de investigación en Tecnologías para la Producción de EAFIT y la empresa Colsteel S.A. participaron en la Feria Internacional del Sector Eléctrico 2009 (Fise) con una iniciativa para optimizar los servicios de alimentación¹³. El proyecto, una marmita autogeneradora

¹³ [Citado 12 de mayo de 2015] Disponible en <<http://www.eafit.edu.co/EafitCn/Noticias/Un+prototipo+muy+eficiente+para+la+preparación+de+alimentos.htm>>

de vapor con tubos de calor para la mejora económica, operacional y energética, fue uno de los ganadores del Concurso “Ingenio”¹⁴ en 2008.

Tabla 5. Principales fabricantes de marmitas autogeneradoras en Colombia

Principales Fabricantes de Marmitas en Colombia		
	<p>Fabrican marmitas autogeneradoras hace varios años con eficiencias considerables. Hoy, se puede decir que es uno de los equipos más importantes del portafolio de fabricación especializada de la empresa.</p>	
	<p>Es una empresa líder, altamente certificada en la fabricación de equipos para la industria alimenticia. En la actualidad, fabrica marmitas autogeneradoras a gas y eléctricas, para capacidades de 50, 100 y 200 litros (MG50 - MG100 - MG200).</p>	

¹⁴ Ingenio: Es un concurso organizado por la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia y la Alcaldía de Medellín, con el apoyo de Colciencias, que premia los proyectos que cumplen con los objetivos básicos de la convocatoria, entre los que se encuentra el de fortalecer la actividad innovadora, con el fin de concretar proyectos enfocados en el desarrollo de conocimientos y tecnologías de futuro.

5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UNA MARMITA AUTOGENERADORA

5.1 MATERIAL

Las marmitas ya sean autogeneradoras o de vapor directo se fabrican en acero inoxidable por su resistencia a la corrosión y propiedades estéticas, que permiten satisfacer las necesidades de la industria y el mercado en general y para el caso de la industria de alimentos y bebidas cumple con las normas de higiene y sanidad, de acuerdo con los requerimientos de la Norma ASTM F-1602 y F-1603. En general, el acero inoxidable usado en las partes de la marmita es el 304 y el 316, por su alta resistencia a la corrosión, entre estos dos el que posee las mejores cualidades es el 316, pero al mismo tiempo un mayor costo, por su alto contenido de níquel y la presencia de molibdeno, además por su composición va más enfocada a la industria química. Por otro lado el acero inoxidable 304 tiene una buena relación calidad/precio y cumple con todos los estándares de calidad para ser usado en la industria alimenticia.

Figura 10. Composición típica del Acero Inoxidable 304, según ASTM A240



Fuente: ASTM A240

Además de requerir un material con estas propiedades, el recipiente del producto tiene un acabado pulido espejo de calidad sanitaria para evitar que los alimentos se peguen o incrusten en la rugosidad del material, el resto del cuerpo se usa un acabado sanitario brillante pero solo por cuestiones de limpieza y apariencia.

5.2 FUNCIONAMIENTO

Una marmita es un recipiente metálico de forma semi-esférica, para la cocción de alimentos u otros productos. La marmita se diferencia de otros recipientes porque cuenta con una doble pared o "chaqueta" por donde se hace circular un fluido térmico (generalmente, vapor de agua) el cual permite calentar de forma indirecta el producto a una temperatura controlada, en función de la presión de saturación del vapor circulante.

Dependiendo de la fuente de suministro de vapor, se pueden tener esquemas centralizados ("marmitas de vapor directo") o descentralizados ("marmitas autogeneradoras de vapor"). Una marmita autogeneradora de vapor, es una variante de las marmitas de vapor directo, en donde la chaqueta de vapor se modifica para permitir que contenga una cantidad fija de agua (para generación de vapor), y se acondiciona un sistema de calentamiento por combustión de gas natural o por resistencias eléctricas. En el caso de calentamiento por combustión de gas natural, el aprovechamiento óptimo de la energía está determinada por la eficiencia del intercambiador de calor entre los gases de combustión y el agua de vaporización, el cual debe integrarse completamente dentro del cuerpo de la marmita, junto con los componentes de control y seguridad y combustión.

5.3 TIPO

Las marmitas pueden ser generalmente de dos tipos: inclinables o fijas. Las marmitas de tipo inclinables facilitan la tarea de vaciar el alimento, principalmente donde se trabajan con grandes cantidades, por lo general se inclinan con una rueda manual o un motor-reductor eléctrico; por otro lado la inmóvil o fija es equipada con una válvula de extracción tangente al fondo del recipiente.

5.4 ESTILO

Independientemente del estilo y de su funcionamiento, las marmitas se pueden instalar de diferentes formas, las más conocidas son de piso (en pedestal o en patas), de pared y de sobremesa para las de menor capacidad.

5.5 CONTROL

El sistema de control de vapor de la marmita es generalmente simple, consiste típicamente en un interruptor de encendido, un selector de temperatura y un control de presión. Las marmitas más pequeñas pueden utilizar termostatos para controlar los ciclos, mientras que las más grandes utilizan un sensor de presión en la camisa. Algunos fabricantes ofrecen líneas opcionales de accesorios, incluyendo controles electrónicos que inician y detienen el calentamiento de agua y operaciones de refrigeración automáticamente.

5.6 DESEMPEÑO

El método ASTM Standard (F1785-97) reporta varios parámetros de rendimiento de vapor incluyendo la potencia máxima, la capacidad de producción, la eficiencia de cocina a la energía y la velocidad del uso de energía, mientras que hierve a fuego lento. Otros factores que afectan el desempeño real del vapor incluyen ergonomía, facilidad de uso y mantenimiento, y la calidad de la construcción.

Tabla 6. Comparación de Desempeño entre marmitas autogeneradoras

Parámetro	Eléctrica- 10 gal	Gas- 10 gal	Gas- 40 gal
Consumo máximo de Energía (Kbtu/h)	35	55	203
Eficiencia De Calentamiento (%)	87	39	54
Capacidad de Producción (gal/h)	41	29	131
Consumo a fuego lento (kBTU/h)	3	7	9

Fuente: Unpublished experience of FSTC from developing and applying the standard test method to three steam kettles.

5.6.1 Máxima Energía a la entrada. La tasa de entrada de energía máxima se determina para las marmitas, mientras que los controles se establecen para la calefacción máxima y los quemadores están encendidos. La potencia máxima de entrada puede ser útil para los operadores de servicios de alimentos para la gestión de la demanda de energía y la estimación de coste energético de un hervidor de agua.

5.6.2 Capacidad de producción. La capacidad de producción se determina durante una prueba de calentamiento que trae el agua de 86 ° F a 160 ° F (30 ° C a 70 ° C). La capacidad de producción puede ser utilizada por los operadores de servicio de alimentos para elegir una caldera de vapor para que coincida con sus requisitos de salida de alimento en particular.

5.6.3 Eficiencia Energética de calentamiento. La prueba de calentamiento se utiliza para determinar tanto la capacidad de producción como la eficiencia energética de la marmita de vapor. Las eficiencias de energía de calentamiento presentado en la tabla 6 se derivan de un período en que los quemadores o elementos de la marmita de vapor están en la entrada completa. En este punto, las paredes de la marmita se estabilizan y la mayor parte de la energía disponible se transfiere al agua dentro de la marmita. Por lo tanto, la eficiencia de calentamiento es un indicador de cierre del rendimiento de la marmita. Como se puede observar la marmita a gas de 10 galones posee la eficiencia más baja, 39% vs. 54% (para 40 gal), probablemente se debe a la poca área de transferencia de calor. Según el reporte de la FSTC la temperatura de los gases de escape es igual o superior a 425 ° C. La gama de la eficiencia de las marmitas a vapor es de 40 -65% y para marmitas eléctricas es del 80-95% según el benchmark realizado por “*Food Service Technology Center*”.

5.6.4 Consumo a fuego lento. La prueba de fuego lento determina la velocidad de la energía, mientras que los alimentos son cocinados a fuego lento.

El consumo a fuego lento es un indicador del rendimiento de la marmita al cocinar alimentos que requieren tiempos de cocción largos, tales como sopas y salsas. Esta información también permite al operador de servicio de alimentos a tener en cuenta el rendimiento energético al elegir una marmita de vapor. La tabla 6 presenta las características de rendimiento de tres marmitas en función de los datos generados por el *Food Service Technology Center*, mediante el método de prueba ASTM estándar para el rendimiento de marmitas a vapor.

5.7 NORMATIVIDAD TÉCNICA APLICABLE

Desde la invención de equipos como las marmitas a vapor y relacionados con recipientes a presión, diversas normas se han dictado para la operación de éstos. A continuación se menciona la normatividad más importante desarrollada al respecto tanto a nivel internacional y nacional, principalmente las establecidas por asociaciones como la *American Society for Testing and Materials –ASTM*, y la *American Society of Mechanical Engineers – ASME*.

Tabla 7. Normatividad Internacional y Norma Técnica Colombiana

Normatividad Técnica Aplicable	
ASTM F1602 -07	Norma de especificaciones para marmitas, de 20 a 200 gal montaje de piso o mesa, de vapor directo, calentamiento eléctrico o gas.
ASTM F1785 -97(2008)	Métodos estándar para pruebas de desempeño en marmitas de vapor.
British Standards BS EN 13886:2005	Maquinaria para el procesamiento de alimentos. Marmitas equipadas con agitadores o mezcladores. Requisitos de seguridad e higiene.
European Normalization EN 203-2-3:2005	Equipo de cocina a gas. Parte 2-3. Requerimientos específicos para marmitas.

ANSI Z83.11	Esta publicación representa una norma básica para una operación segura, construcción sólida y duradera, y un rendimiento aceptable del equipo de servicio de alimentos que utiliza gas combustible.
ASME, Sección VIII	Requisitos de normatividad técnica específica para el diseño de recipientes a presión.
NTC4082	Equipos de cocción para uso comercial que funciona con gas natural. Requisitos de seguridad.
NTC 3765	Requisitos generales de seguridad para artefactos a gas de uso doméstico y comercial y su instalación.
NTC 3833	Dimensionamiento, construcción, montaje y evaluación de los sistemas para la evacuación de los productos de la combustión generados por los artefactos que funcionan con gas.

6 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA MARMITA

Uno de los parámetros más importantes al evaluar el desempeño de una marmita autogeneradora de vapor a gas es su eficiencia de calentamiento (eficiencia energética total). Esta eficiencia engloba la eficiencia térmica, que es igual a la eficiencia de la combustión por la eficiencia de la transferencia de calor a la carga (agua de vaporización).

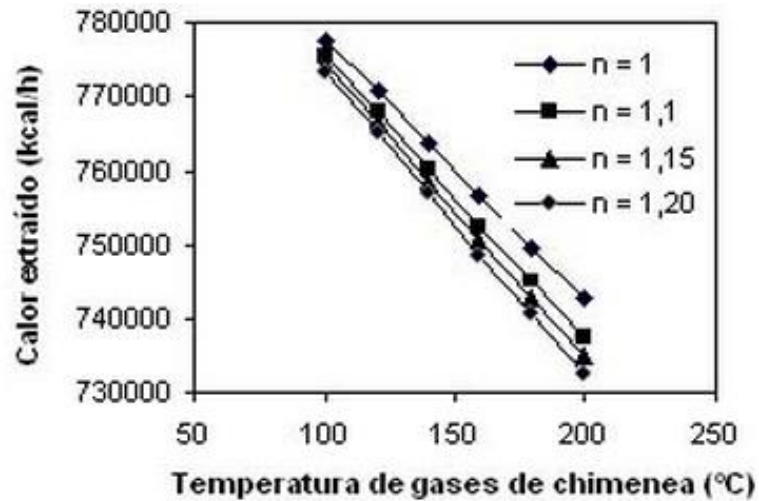
6.1 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Para obtener el mejor desempeño, se requiere aprovechar al máximo la energía disponible en el combustible, que se libera en la combustión. En un estudio realizado por la Universidad Nacional de Salta¹⁵, en donde se realizaron simulaciones de procesos de combustión de gas natural en busca de determinar la temperatura y los perfiles de concentración de metano, oxígeno, monóxido y dióxido de carbono a la salida de la cámara de combustión, se puede observar la necesidad de contar con una adecuada relación Aire/Combustible.

Además recomiendan, utilizar un exceso de aire entre $n=1$ (mínimo o estequiométrico), hasta $n=1,2$, rango de coeficientes de exceso de aire normalmente utilizado para combustión de gas natural. Con menores excesos de aire o una combustión incompleta se obtienen índices elevados de carbono parcialmente oxidado (CO), muy peligroso para la salud humana. Con mayores excesos de aire, se incrementan las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y se tiene un volumen mayor de componentes del aire que no participan en la reacción, como nitrógeno y gases inertes, que arrastran la energía liberada en forma de calor sensible que se pierde por la chimenea.

¹⁵ VILLAFLORES Gloria, MORALES Graciela y VELASCO Jorge. Variables significativas del proceso de combustión del gas natural. Universidad Nacional de Salta. p.2. Disponible en <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642008000400008>

Figura 11. Efecto de la temperatura de gases de combustión sobre el calor extraído



Fuente: VILLAFLORES Gloria, MORALES Graciela y VELASCO, Jorge. Variables Significativas del Proceso de Combustión del Gas Natural.

En la Figura 12 Se muestra el efecto de la temperatura de los gases de combustión sobre el calor extraído (calor entregado a la carga), tomando una temperatura del aire de 25 °C, utilizando distintos excesos de aire. A medida que aumenta la temperatura de los gases de chimenea disminuye el calor extraído, porque aumenta el calor sensible perdido en los gases al aumentar la temperatura de los mismos. Se observa, también, que a temperatura de gases de chimenea constante el calor extraído disminuye con el exceso de aire¹⁶.

6.2 EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Inmediatamente después del proceso de combustión, en donde se espera la mejor disponibilidad de la energía liberada, este calor se entrega a la carga mediante convección. Este mecanismo de transferencia de calor se expresa con la siguiente ecuación:

¹⁶ *Ibíd.*, p. 4.

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_i - T_o)$$

Donde:

***h** = Coeficiente de transferencia de calor*

***A** = Área de contacto*

***T_i** = Temperatura de los gases de combustión*

***T_o** = Temperatura de la superficie metálica*

El coeficiente de transferencia depende de las características térmicas y físicas del fluido (densidad, viscosidad, conductividad) y además del régimen y velocidad del flujo. También es necesario observar el tiempo de retención de los gases dentro de la marmita, pues está relacionado con la disponibilidad para entregar su energía al agua de vaporización. Luego de que la energía se entrega al agua de vaporización, se empieza a acumular en forma de energía sensible con un aumento de temperatura y energía latente con un aumento de la presión.

6.3 EFICIENCIA DE CALENTAMIENTO

Para el cálculo de la eficiencia global de una marmita de forma indirecta se deben tener en cuenta cada uno de los factores descritos anteriormente, pero se puede calcular de una manera directa de acuerdo con el procedimiento de la Norma ASTM-F1785. A través del procedimiento descrito en esta norma, se evalúa la energía útil que se entrega al producto, medida en forma de calor sensible y se compara con la energía consumida contenida en el combustible (energía química). Para esto, se necesita conocer el poder calorífico superior, y el volumen de gas consumido para incrementar la temperatura de una cantidad conocida de agua en un intervalo dado. La eficiencia de calentamiento se determina con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{mCp(T_f - T_i)}{V_{std}PCS}$$

Donde:

m = masa conocida de agua

C_p = Calor específico del agua

$(T_f - T_i)$ = Incremento de temperatura

V_{std} = Volumen de combustible consumido a condiciones estándar

PCS = Poder calorífico superior del combustible

6.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor se conoce como el intercambio de energía térmica entre cuerpos debido a la diferencia de temperatura, el intercambio de calor siempre se da desde el cuerpo más caliente hacia el cuerpo con temperatura más baja; como lo describe la ley cero y la segunda ley de la termodinámica esto se da hasta que los dos cuerpos alcancen la misma temperatura.

6.4.1 Mecanismos de transferencia de calor. La transferencia de calor se caracteriza por tres mecanismos físicos que son:

6.4.1.1 Transferencia de Calor por Conducción. Este mecanismo se presenta a través de medios estacionarios, teóricamente toma lugar en un gas a través de colisiones de las moléculas, en un fluido a través de oscilaciones de cada molécula en una "jaula" formada por sus vecinas más cercanas y en sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La ecuación que determina la transferencia de calor es conocida como ley de Fourier, la cual establece que el flujo de transferencia de calor es directamente proporcional y con sentido contrario al gradiente de temperatura presente en el medio¹⁷.

$$\dot{Q}_{conductividad} = -KA \frac{dT}{dx}$$

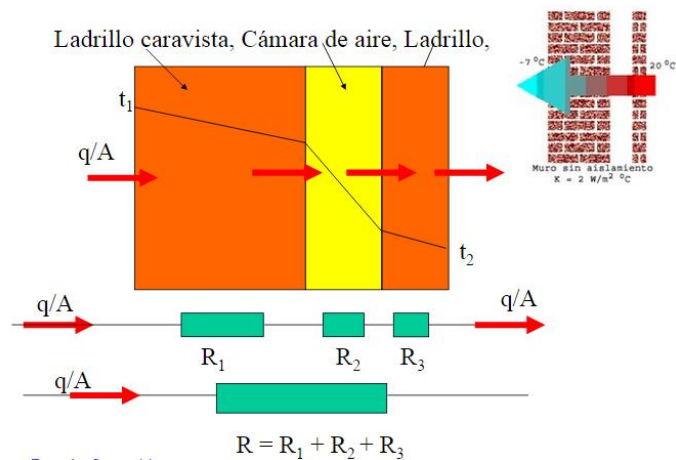
¹⁷ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. 3 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2007. P.18.

Donde:

K = Conductividad térmica del medio; Capacidad que tiene dicho medio para conducir el calor.

6.4.1.1.1 Conducción en paredes compuestas: Por lo general una pared está compuesta por varios materiales, cada material tiene una constante de proporcionalidad (K) diferente. En la figura 13 se presenta una pared compuesta por 3 materiales diferentes en donde el flujo de calor debe ser el mismo que entra por la izquierda al que sale por la derecha sino se tiene en cuenta el incremento de la energía interna de cada material debido a la acumulación de calor.

Figura 12. Conducción: Estado estacionario. Unidimensional (pared multicapas)



Fuente. Procesos de Transporte [Energía y Masa] Alfonso Calera, Física Ambiental Aplicación al Balance de Energía en la Superficie Terrestre.

Como se observa en la figura 13 la razón entre la diferencia de temperatura y la resistencia de cada capa, debe ser igual a la razón de la diferencia de temperatura total entre la resistencia total. El flujo de calor tiene que atravesar cada uno de los diferentes materiales de la pared, donde cada uno de ellos ofrece una resistencia al paso del mismo dependiendo de las propiedades (K) y el espesor del material (l)

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t_1}{R_1} = \frac{\Delta t_2}{R_2} = \frac{\Delta t_3}{R_3}$$

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_1 - t_1^\circ}{\frac{l_1}{k_1 A}} = \frac{t_1^\circ - t_2^\circ}{\frac{l_2}{k_2 A}} = \frac{t_2^\circ - t_2}{\frac{l_3}{k_3 A}}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

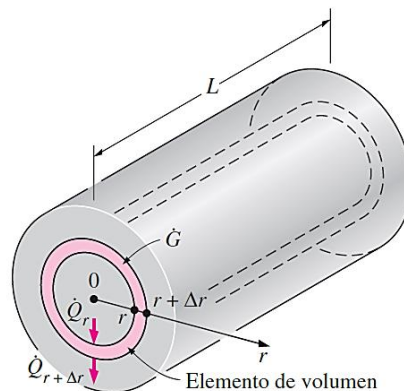
6.4.1.1.2 Conducción en Cilindros largos. En cuerpos cilíndricos el área transversal de transferencia de calor va aumentando a medida que se aumenta el radio del cilindro, la ecuación para la conducción de calor a través de las paredes de un cilindro se representa como:

$$\dot{Q} = 2\pi r L K \left(\frac{-dt}{dr} \right)$$

Suponiendo que el flujo de calor va de r_1 a r_2 , se puede integrar la ecuación anterior y evaluar en las fronteras (r_1 y r_2):

$$\dot{Q} = 2\pi r L K \left(\frac{t_1 - t_2}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \right)$$

Figura 13. Dimensiones para transferencia de calor en cilindro largo.



Fuente. CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. 3 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2007. P.69

6.4.1.2 Transferencia de calor por convección. Este mecanismo de transferencia de calor toma lugar a través del desplazamiento neto de un fluido, que transporta el calor contenido en a través de su propia velocidad, donde por ejemplo si un fluido frío rodea una superficie caliente, una parte del fluido recibirá una energía que aumentará su temperatura que posteriormente cederá al mezclarse con el resto del fluido, el movimiento del fluido puede ser causa de forma natural por diferencia de densidades o puede ser forzado a través de una fuerza externa, como es el caso de un ventilador con el aire o una bomba con el agua, en algunos casos hay presencia de convección natural y forzada simultáneamente. La ecuación que describe el fenómeno es conocida como Ley de enfriamiento de Newton y se define de la siguiente forma¹⁸:

$$\dot{Q} = hA(T_1 - T_2)$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor convectivo; función de las propiedades del fluido y de la superficie, del tipo de flujo que presenta el fluido y de la manera en que se genera el movimiento del fluido.

6.4.1.3 Transferencia de Calor por Radiación. La transferencia de calor por radiación toma lugar a través del transporte de fotones. Este mecanismo de Transferencia no necesita de un medio de propagación, está asociado a la energía que emite un cuerpo (a una determinada temperatura), la capacidad de emisión de energía depende de las propiedades del cuerpo y de la temperatura a la cual se encuentre. La energía radiante obedece a lo descrito en la teoría electromagnética de Maxwell. La razón neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies se da por:

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{alred}^4)$$

Donde:

¹⁸ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. 3 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2007. p.69

$\varepsilon =$ Emisividad del cuerpo, oscila entre 0 y 1.

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$; Constante de Stefan- Boltzmann.

La **Ecuación Global de Calor**, (asume conservación de masa) que encierra todos los fenómenos de transferencia de calor, queda definida como:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \left[\frac{T}{\rho} \frac{\partial p}{\partial T} \right]_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) p \right) + Q$$

Donde:

ρ = densidad

C_p = Calor específico a presión constante

T = Temperatura absoluta

u = vector de velocidad

q = Flujo de calor por conducción

p = Presión

T = Tensor de esfuerzos viscosos

S = Tensor de deformación

Q = Contiene fuentes de calor que no sean calentamiento viscoso

6.4.2 Intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor son equipos diseñados usualmente para operar por largos periodos de tiempo sin cambios en sus condiciones de operación, para transmitir la energía térmica desde un medio a otro (se encuentran a diferentes temperaturas). Las industrias de refrigeración y aire acondicionados, así como los procesos químicos son ejemplos donde se pueden encontrar estos equipos térmicos.

Por sus características los intercambiadores de calor pueden ser modelados como dispositivos de flujo estable. El flujo másico de cada fluido y sus propiedades en un punto específico permanece constante, además las corrientes de flujo experimentan

cambios despreciables en su velocidad y elevación, por lo que también lo son los cambios de energía cinética y potencial. El calor específico de un fluido, en general, cambia con la temperatura. Pero, en un rango de temperatura específico puede ser tomado como constante en un valor promedio. La transferencia de calor axial a lo largo del tubo también es despreciable y las paredes exteriores del intercambiador pueden ser tomadas como aisladas, sin pérdidas al medio. La primera ley de la termodinámica enuncia que la velocidad de transferencia de calor desde el fluido caliente al frío debe ser igual a la velocidad de recepción del calor del fluido frío.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c,o} - T_{c,i}) = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h,i} - T_{h,o})$$

Donde \dot{Q} (Velocidad de transferencia de calor) es una cantidad positiva en la dirección del fluido de mayor temperatura hacia el de menor temperatura (Segunda ley de la termodinámica).

Los intercambiadores de calor se dividen en tres categorías principales de acuerdo con el arreglo del flujo, su función y forma de construcción. Según su función se pueden clasificar en:

- **Evaporadores:** Son intercambiadores de calor que tienen como función enfriar un fluido mediante la expansión de un gas de características especiales; son muy usados en sistemas de enfriamiento de agua (chiller) o de gases como en el acondicionamiento de aire.
- **Condensadores:** Son intercambiadores que disminuyen la temperatura de gases, vapores, entre otros, con el objetivo de extraer la cantidad de energía térmica necesaria que permita un cambio de fase (gas a líquido); también son muy utilizados en sistemas de refrigeración para extraer el calor del refrigerante (condensación).

Otros tipos de intercambiadores que se encuentran en esta categoría son los serpentines y calentadores; los intercambiadores tipo condensadores y

calentadores se caracterizan porque uno de los fluidos sufre un cambio de fase por tal razón la velocidad de transferencia de calor se expresa como:

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg}$$

Donde:

\dot{m} = Tasa de evaporación/condensación del fluido.

h_{fg} = La entalpía de vaporización del fluido a una temperatura y presión específicas.

En estos procesos uno de los fluidos absorbe o libera gran cantidad de calor gracias al cambio de fase presente. La velocidad de transferencia de calor en un intercambiador también puede ser expresada empleando la ley de enfriamiento de Newton¹⁹:

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_{ml}$$

Donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor

A_s = Área de transferencia

ΔT_{ml} = Diferencia de temperatura media logarítmica

6.4.3 Espesor de aislamiento térmico: En el diseño del aislamiento térmico de un intercambiador de calor, se tiene principalmente el mecanismo de transferencia de calor por Conducción

- **Conducción:** El flujo de calor conductivo está dado por Ley de Fourier:

$$q_i = - \sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

Donde k_{ij} es la conductividad térmica.

¹⁹ Fundamentos de transferencia de calor, Frank P. Incropera, David P. de WITT, Cuarta edición, Pearson Prentice hall mexico 1999 pag,590

7 REINGENIERÍA: MARMITA AUTOGENERADORA DE VAPOR CONSTRUIDA POR EL CDT DE GAS

En la tabla 8, se presenta el resumen del análisis de mejoras que se planteó en junto con los profesionales de la corporación CDT de Gas al iniciar este proyecto, luego de estudiar el primer prototipo desarrollado y de encontrar cada una de las ventajas y desventajas presentes en este modelo que no permitieron alcanzar los requerimientos de diseño planteados.

Tabla 8. Análisis de mejoras para el prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas natural.

Parámetro	Línea Base	Observación	Mejora sugerida	Recomendaciones al diseño
Potencia (firing rate)	6,5kW	Mayor potencia de calentamiento, en especial para disminuir los tiempos de cocción.	Incrementar la potencia de fuego, de acuerdo a los requerimientos calculados para el proceso: 34Kw	Seleccionar quemadores de mayor potencia e inyectores con diámetros requeridos para la descarga de gas necesaria.
Capacidad	75lt (20gal)	Se desea una mayor capacidad en el recipiente de cocción teniendo en cuenta la capacidad de producción de los diferentes sectores.	Incrementar la capacidad del tamaño nominal según ASTM F1602: 40 gal (151,4lt)	Incrementar las dimensiones del recipiente de cocción.
Relación Capacidad/Potencia	86W/litro	La capacidad de calentamiento es muy baja para el tamaño propuesto.	Incrementar la potencia específica por unidad de capacidad, hasta 200 W/litro	Incrementar la potencia del sistema de intercambio de calor proporcionalmente a los nuevos quemadores.
Eficiencia energética	53%	Si bien la eficiencia energética obtenida es relativamente buena, es muy deseable obtener la mejor eficiencia posible con el fin de disminuir los costos de operación y emisiones atmosféricas asociadas.	Incrementar la eficiencia a un rango del 60 a 65%. Nota: 65%, mejor valor reportado por fabricantes.	Diseñar una configuración que maximice la entrega de calor.

Exceso de aire en gases de combustión	68%	Si bien es necesario contar con un exceso de aire respecto al estequiométrico para garantizar una combustión completa, se obtuvo un exceso de aire relativamente alto que aumenta las pérdidas de energía a través de la chimenea, por un mayor caudal de gases calientes que escapan a la atmósfera.	Disminuir a 15-20% el exceso de aire en los gases de combustión, limitando la formación de monóxido de carbono a 100ppm	Utilizar quemadores de premezcla total de alta eficiencia, en una cámara de combustión sellada, para limitar el ingreso de aire secundario. Controlar la relación aire/combustible, mediante el ajuste manual de la posición de los inyectores.
Tiempo de calentamiento (30-70°C)	52min	El tiempo de calentamiento es relativamente muy alto, lo cual afecta sensiblemente los tiempos de producción.	Disminuir el tiempo de calentamiento a 30 min	Aumentar la potencia de fuego
Encendido	Piezoeléctrico	El encendedor piezoeléctrico presenta problemas de confiabilidad, pues se necesitaban numerosos intentos antes de lograr encender el piloto	Implementar un sistema de encendido más confiable	Alternativas: <ul style="list-style-type: none"> • Encendedor manual con baterías • Encendedor electrónico por chispeo continuo • Encendedor de superficie caliente
Supervisión de llama	Sensor de temperatura	En general, el sensor de llama por temperatura funciona bien.	Ninguna	Ninguna
Control de temperatura	Válvula de gas termostática SIT710	La válvula SIT710 implementada presenta varios inconvenientes: <ul style="list-style-type: none"> - el intervalo de temperatura (50-190°C) excede significativamente e el intervalo seguro de operación (hasta 140°C) - El termostato no tiene posibilidad 	Implementar un control de temperatura más robusto, con un intervalo de operación dentro de los límites seguros, indicación de temperatura y parámetros configurables	Seleccionar un controlador de temperatura electrónico, con los siguientes requerimientos: <ul style="list-style-type: none"> Indicación de temperatura Selección de temperatura límite Configuración de intervalo de respuesta

		de controlar el intervalo de respuesta, - No indica la temperatura actual		Límites de temperatura cercanos a los límites seguros de operación.
Aislamiento	Espuma SOLIMIDE <ul style="list-style-type: none"> • Conductividad: 0,046 W/m*K (a 120°C) • Densidad 6.4kg/m³ • Temperatura máxima: 300°C • Espesor: 1in 	La espuma SOLIMIDE se seleccionó como material experimental, dado que no es común para este tipo de aplicaciones pero tiene altas prestaciones especialmente por su baja densidad y baja conductividad, similar a la lana de roca. Sin embargo, su costo es significativamente mayor frente a otros materiales más comunes.	Seleccionar e implementar un material aislante sustituto de la espuma SOLIMIDE. Por ejemplo, la lana mineral aglutinada presenta buenas características de conductividad y temperatura máxima, y relativo bajo costo.	Lana Mineral ROLLOFLEX: <ul style="list-style-type: none"> • Conductividad: 0,25 Btu in. / ft.² h (a 100 °F) • Densidad: 64kg/m³ • Temperatura máxima: 454°C • Respaldo en foil de aluminio. • Espesor: 1 ½ in
Visor de nivel	De vidrio con válvulas de aislamiento	En general, el visor de nivel funciona bien	Ninguna	Ninguna
Válvula de seguridad	Válvula de seguridad (30 psi)	En general, la válvula de seguridad funciona bien	Ninguna	Ninguna
Descarga del producto	Tubo de 1in de diámetro en el fondo del recipiente	El tubo de salida no es suficiente para facilitar la descarga del producto	Incrementar el área de salida del producto	Alternativas: <ul style="list-style-type: none"> • Diseño de marmita volcable • Tubo de salida más amplio, al menos 2 in.

7.1 REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO

Desde el año 2008 el CDT de Gas ha estudiado la tecnología de la marmita autogeneradora de vapor a gas como una alternativa de generación descentralizada enfocada a la producción de dulces a base de frutas, principalmente el bocadillo; En el proceso de desarrollo del primer prototipo de esta tecnología desarrollado por la corporación se establecieron los requerimientos del diseño orientados al usuario, proceso, normatividad técnica (ICONTEC, ASTM y ASME).

Tabla 9. Requerimientos de Diseño orientado al usuario.

Marmita autogeneradora de vapor a gas		
Criterio	Requerimiento General	Consideraciones para el Diseño
Eficiencia	La marmita es eficiente	La eficiencia de la marmita se encuentra en el rango de 60 a 65%
Seguridad	La operación de la marmita es segura	La marmita tiene válvula limitadora de presión, y válvula de gas con supervisión de llama.
Utilidad	La marmita es útil	La marmita es útil para la cocción de dulces de fruta a temperatura controlada. El producto no se pega ni quema en la superficie del recipiente.
Mantenibilidad	Los componentes son accesibles para mantenimiento y limpieza	Los elementos de control están ubicados en un panel, y son accesibles para limpieza y mantenimiento.
Autonomía	La marmita es autónoma.	La marmita opera autónomamente, requiere un mínimo de supervisión.
Sustentabilidad	La fabricación de marmitas es sustentable con el medio ambiente.	La marmita opera eficientemente con un combustible fósil relativamente limpio. La marmita es reciclable al final de su vida útil.
Economía	La marmita es económica en su operación.	La eficiencia de la marmita le permite ser relativamente económica en su operación.
Higiene	La marmita es higiénica, no contamina al alimento con sabores, olores o partículas.	La marmita está fabricada en acero inoxidable acabado satinado, que no desprende herrumbre.
Estética	La marmita es agradable a la vista.	La marmita consiste en un módulo compacto, de material brillante. Los elementos de control y el quemador están ocultos a la vista.

Fuente: MANRIQUE, Víctor. Proyecto de grado. Modificado por el autor²⁰.

Para el nuevo prototipo de marmita los requisitos orientados al usuario se conservan ya que va enfocada al mismo sector industrial, es apropiado resaltar que con la reingeniería del prototipo se busca alcanzar la mayor eficiencia reportada en el estado del arte la cual es 65%, o un porcentaje cercano a esta. Por otro lado es importante notar que la reingeniería se realizó como respuesta a que muchos de los requisitos no fueron alcanzados principalmente en el criterio de autonomía, ya que este modelo presenta fallas en el sistema de control lo que evita que sea adecuada

²⁰ MANRIQUE, Víctor. Op.cit. p. 70

para el usuario. Por último, el criterio de estética para el nuevo prototipo de marmita se mejoró con la ayuda de la estudiante de Diseño Industrial Denis Gómez de la Universidad Industrial de Santander que se encontraba como practicante en la corporación CDT de Gas.

Todas las especificaciones para el nuevo modelo de marmita se extraen de la Norma ASTM F1602-07 “Especificaciones Estándar para marmitas de vapor de 20 a 200 gal (75,7 a 757 L), de montaje en piso o en pared; de vapor directo, Autogeneradora eléctrica o a gas”. La clasificación en esta norma se realiza por cinco criterios identificados en la tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones del nuevo prototipo de marmita según ASTM 1602

CLASIFICACIÓN ASTM F1602	
Tipo	
Tipo I (Fija) ✓	Tipo II (Volcable)
Tamaño	
20 gal (75,7 L)	80 gal (302,8 L)
25 gal (94,6 L)	100 gal (378,5 L)
30 gal (113,6 L)	125 gal (472,1 L)
40 gal (151,4 L) ✓	150 gal (567,8 L)
60 gal (227,2 L)	200 gal (757 L)
Grado	
Grado 1 (15-25 psig)	Grado 3 (50-90 psig)
Grado 2 (25-50 psig) ✓	
Estilo	
Estilo 1 (De pedestal)	Estilo 3 (Pared)
Estilo 2 (Soportes) ✓	Estilo 4 (Cabina)
Clase	
Clase A (Fuente de vapor directo)	Clase B (Autogeneradora a Gas) ✓
Clase C (Autogeneradora Eléctrica)	

Por medio de la norma ASTM F1602-07 se estableció los materiales para la fabricación de la Marmita Autogeneradora de Vapor, en esta norma se enuncia los materiales recomendados para cada una de las partes como lo son el recipiente, chaqueta de vapor, partes en contacto con productos de la combustión, para el exterior, entre otras, pero en general el material exigido por la norma es el acero inoxidable ya sea el ASTM A-167 Grado 316 y 316L; el ASTM A-240/A-240M Grado 304 y 304L. Seleccionó el Acero Inoxidable ASTM A-240/A-240M Grado 304, por su buena relación calidad/precio (muy importante para poder desarrollar un producto accesible para la industria Nacional) y la facilidad de encontrar en la Industria metalmecánica local, además de que cumple con todas las características y estándares de calidad para ser utilizado en aplicaciones alimenticias

7.2 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

En las pruebas de desempeño en laboratorio realizadas en el primer prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas (para 65 kg de agua), siguiendo el procedimiento presente en la norma ASTM F1785, se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados obtenidos: pruebas de desempeño en laboratorio del primer prototipo

Prueba de eficiencia en laboratorio		
Tiempo total de prueba	3123	s
Transferencia de calor al agua	3,5	kW
Calor sensible recibido	10888,8	kJ
Energía térmica entregada por el gas	20404,46	kJ
Eficiencia	53,36	%

Realizando una revisión más a fondo de la potencia térmica del primer prototipo se identificó que uno de los principales problemas de diseño fue debido al sobredimensionamiento de la potencia requerida para el proceso ya que los cálculos de requerimientos y variables involucradas en el proceso presentaron errores. Analizando los datos obtenidos en las pruebas:

$$t_{total} = 52,05 \text{ min} = 3123 \text{ s}$$

$$V_{gas} = 548,507 \text{ lt} = 0,548 \text{ m}^3$$

$$\therefore \dot{Q} = 10,538 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 1,756 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$HHV (\text{Poder Calorífico superior gas Guajira}) = 37159,634 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}; \text{Fuente: TGI}$$

$$P = \dot{Q}HHV = 6,526 \text{ kW}$$

Por otro lado hallando la potencia según lo establecido en el procedimiento de la norma ASTM F 1603 (07)²¹, donde enuncia que se debe elevar la temperatura del agua (90% a rebose) de 30°C a 70°C en un tiempo máximo de 15 min para el caso de marmita autogeneradora con capacidad de 20 galones. Con esto la potencia es igual a 12,13 kW, utilizando un calor específico promedio del agua de 4200J/kg°C y una masa de 65 kg. Utilizando la eficiencia obtenida en la prueba podemos calcular la potencia real requerida por el proceso (para una eficiencia de 53%).

$$P_T = \frac{12,13 \text{ kW}}{0,53} = 22,74 \text{ kW}$$

Comparando las dos potencias indica que la potencia real suministrada en el sistema, sólo alcanzó un **28,7%** de la potencia requerida en el proceso.

²¹ American Society for Testing Materials. ASTM F1603 (07): Standard Specification for Kettles, Steam-Jacketed, 32oz to 20 gal (1 to 75,7 L), Tilting, Table Mounted, Direct Steam, Gas and Electric Heated.

Tabla 12. Balance de masa para ingredientes en la formulación de un bocadillo

Ingredientes	100g	°Brix	S.S.A (+) g	Total g	S.S.T. (*) g
Pulpa guayaba	60	10	6.0	30000	3000
Jarabe invertido (5%)	4,9	70	3,4	2464	1725
Sacarosa (95%)	65,5	100	65,5	32703	32703
Ácido cítrico (ml. 50)	0,45	32	0,1	225	72
Total inicial	131		57,7	65392	37500
Agua a evaporar	31	-	-	15392	-
Total final	100		75.0	50000	37500

+sólidos solubles aportados * sólidos solubles totales

Fuente: UNAL²²

Por medio de un procedimiento para la formulación de bocadillos a partir de pulpa de guayaba desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia a través del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimento (ICTA) se puede realizar un cálculo confiable de la cantidad de producto obtenido a partir de una cantidad definida de ingredientes, así como la cantidad de agua contenida en la emulsión que debe evaporarse. Para el caso de la cocción de bocadillo, el primer prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas se diseñó para una capacidad de producción/ciclo de 50 kg, donde se obtuvieron los requerimientos energéticos por medio de las siguientes ecuaciones.

$$Q_s = m * C_{p_{guayaba}} * (T_f - T_i) = 15372,675 \text{ kJ}$$

$$Q_l = m_{\text{agua a evaporar}} * h_{fg} = 34642,5 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{producto}} = Q_s + Q_l = 50015,175 \text{ kJ}$$

Donde:

$T_f = \text{Temperatura final del producto [93°C]}$

$T_i = \text{Temperatura inicial del producto [16,5]}; \text{Fuente: IDEAM}$

²² Transformación y Conservación de Frutas. Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, ICTA. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Contenido en línea. Disponible en < <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/index.html> >

$$C_{p\text{guayaba}} = 4,019 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}; \text{Fuente: CIMPA}$$

$$m_{\text{agua a evaporar}} = 15,5 \text{ kg}; \text{Fuente: UNAL}$$

Asumiendo la misma eficiencia obtenida en las pruebas de laboratorio (53,36%), con el poder calorífico de 42713, 692 kJ/m³ (Referencia: TGI) y un tiempo de cocción para el proceso de 75 min de acuerdo a la capacidad de producción.

$$\text{FiringEnergy} = \frac{\text{HeatupEnergy}}{\text{Efficiency}} = \frac{50015,175\text{kJ}}{0,53} = 94368,25\text{kJ}$$

$$\text{FiringRate} = \frac{\text{FiringEnergy}}{\text{time}} = \frac{94369,25\text{kJ}}{3600\text{s}} = 20,97\text{kW}$$

7.2.1 Potencia térmica requerida en el nuevo modelo. La potencia necesaria para el nuevo equipo donde se espera llevar los 136 kg de agua de 30°C a 70°C en un tiempo de 20 minutos en las pruebas de eficiencia, se utiliza el mismo procedimiento empleado en el primer prototipo, lo que indica que se requieren 3 quemadores que alcancen en conjunto una potencia de 30kW. Como medio de comparación, utilizando esta potencia para calcular la producción de bocadillo según los requerimientos energéticos se estima un tiempo máximo de 80 min para una producción de 100 Kg/ciclo.

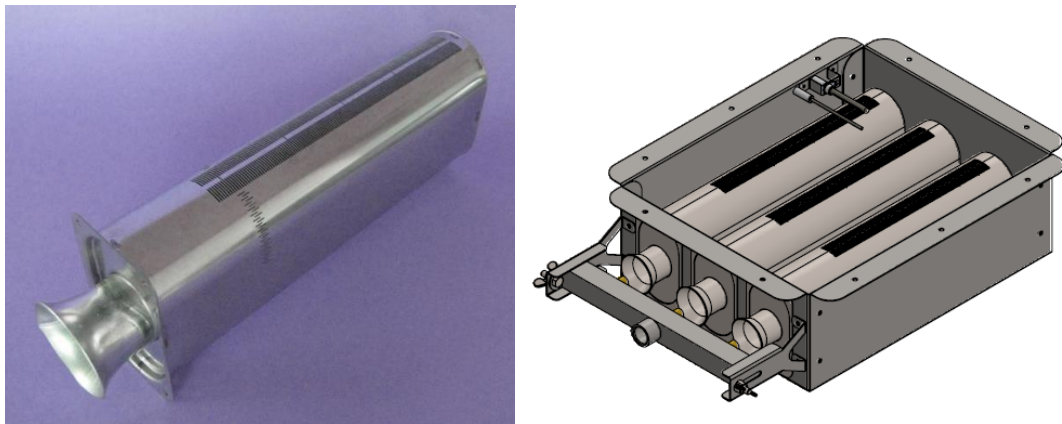
7.2.1.1 Selección de componentes del tren de gas y control de ignición.

7.2.1.1.1 Quemadores atmosféricos. Los quemadores seleccionados para abastecer los 30 kW requeridos son quemadores tipo OVO. Este es un quemador atmosférico hiperestequiométrico con reducidas emisiones contaminantes de CO y NO_x, estudiado especialmente para las calderas de suelo de sencilla construcción. El funcionamiento atmosférico es simple, en comparación con el de un tradicional quemador tubular²³.

²³ [Citado 21 de Junio 2015] Disponible en
<http://www.polidoro.com/ImmaginiCaricate/POLIDORO_OVO.pdf>

En los quemadores tipo OVO las emisiones de CO y NO_x son muy bajas, respetando los límites más restrictivos establecidos por las normas. Además, gracias a que la combustión con estos quemadores utilizan exclusivamente aire primario, permite un mayor aprovechamiento de la energía entregada, a diferencia de la mayoría de sistemas de combustión presentes en los modelos de marmitas a nivel nacional, los cuales son quemadores atmosféricos en donde gran parte de la energía se pierde por radiación y convección al ambiente.

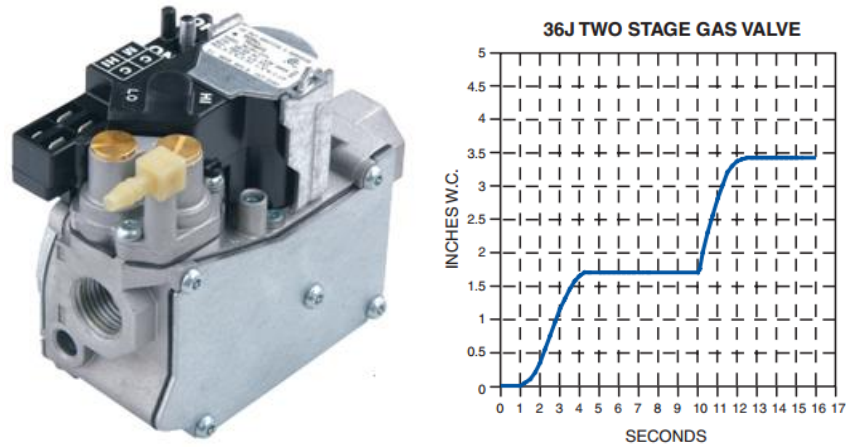
Figura 14. Sistema de combustión del nuevo prototipo de marmita



Es claro que al utilizar quemadores de pre-mezcla total puede existir la posibilidad de que no se entregue el aire necesario para la combustión, por esta razón al nuevo prototipo de marmita se le adaptó un damper a la salida de la chimenea para regular el caudal de los gases de combustión y un sencillo mecanismo para poder variar la ubicación de los inyectores con respecto a la boquillas de los quemadores. El primer prototipo a pesar de que también tenía un damper no se logró disminuir el exceso de aire inferior al 67% en las pruebas realizadas, lo que incrementó las emisiones de óxidos de nitrógeno y pérdidas por la chimenea, por tal razón en este nuevo prototipo se debe garantizar el porcentaje de exceso de aire en la combustión, que debe estar en un rango del 15% al 20%.

7.2.1.1.2 Válvula de Gas. Para el flujo de gas en los quemadores se seleccionó una válvula de apertura lenta de dos etapas con varios fines, la primera función de la válvula es permitir un encendido suave de los quemadores suministrando una bajo flujo de caudal para evitar los “fogonazos” o “pequeñas explosiones” presentados en el primer prototipo ocasionados por la acumulación de gas en la cámara antes de presentar la combustión, esto ocasionado también por el encendido piezoeléctrico el cual es muy poco confiable e inseguro en este proceso, ya que requería de varios intentos antes de poder encender el piloto.

Figura 15. Típica curva de operación de la válvula de gas de dos etapas White Rodgers 36J55-214



Fuente: www.emersonclimate.com

Tabla 13. Características Válvula de gas seleccionada

Válvula de gas White Rodgers 36J55-214	Two stage
	Slow opening
	Max pressure 5 inWC

Por otro lado el uso de la válvula permite el control de dos niveles de potencia usados para un calentamiento rápido al inicio o un sostenimiento a potencia media, según lo requiera el proceso a diferencia de la válvula SIT710 utilizada en el primer prototipo.

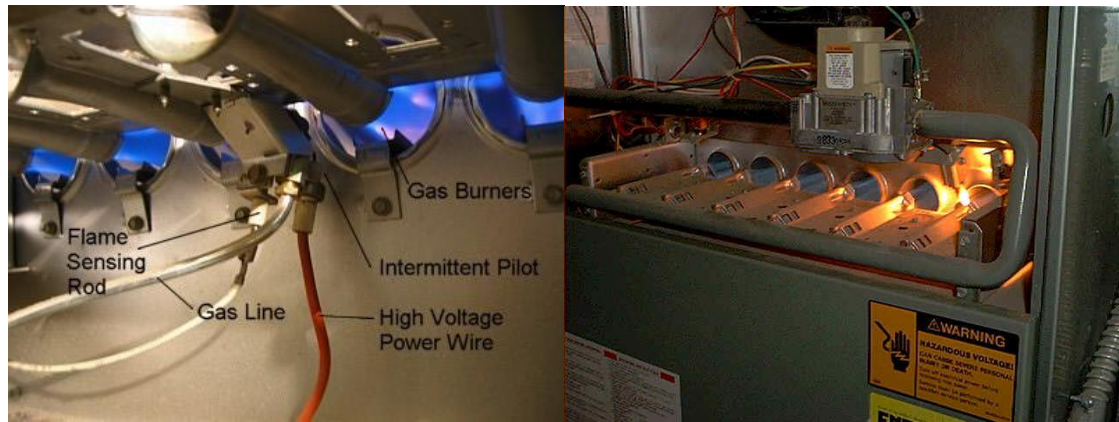
7.2.1.1.3 Control de Ignición

El propósito del sistema de ignición es encender la mezcla aire/combustible en la cámara de combustión en el momento adecuado con el fin de maximizar la eficiencia del sistema. Si el sistema de ignición presenta fallas se verá afectado directamente el control operacional de la marmita haciendo que esta sea peligrosa para el usuario, normalmente cuando el control de ignición se desajusta, pueden existir fallas como la acumulación de gas natural dentro de la cámara de combustión lo que causa los llamados “fogonazos” o “pequeñas explosiones”. Sin embargo, el tiempo de encendido óptimo también se ve afectada por factores como la forma de la cámara de combustión y la temperatura dentro de la cámara de combustión.

El sistema de encendido eléctrico en un horno de gas, caldera o marmita es un invento moderno que permite un uso más fiable que el que ofrecen el piloto encendido. El encendido eléctrico, además, ahorra energía y contribuye a una mejor eficiencia del aparato. Por estas razones, se propone el uso de un control de ignición con encendido electrónico que nos proporcione el tiempo ideal de ignición ayudando a que la marmita sea energéticamente eficiente. Según el gobierno de los Estados Unidos, dichos sistemas superan la clasificación mínima AFUE del 78%. El encendido eléctrico se produce, generalmente, de dos maneras:

- El sistema de piloto intermitente utiliza una chispa eléctrica de alto voltaje controlada electrónicamente para encender el piloto de gas y a continuación los quemadores principales, cuando el termostato necesita calor.
- El sistema de encendido por superficie caliente utiliza un elemento de calentamiento por resistencia con control electrónico, no muy distinto al filamento de la bombilla, para encender el quemador de gas.

Figura 16. Encendido por piloto intermitente (izquierda), Horno con sistema HSI (derecha)



Fuente: <http://homerepair.about.com>, <http://www.stevejenkins.com>

Encendido por superficie caliente funciona como el filamento de una bombilla de luz, sólo que aquí el elemento es el calor y no la luz. El encendido de superficie caliente se fabrica generalmente de un material como el carburo o nitruro de silicio que a medida que la electricidad pasa a través del encendido, se ilumina de rojo vivo.

Como una alternativa al problema del encendido piezoeléctrico se seleccionó el control de ignición White Rodgers 50E47-843 Universal por superficie caliente (HSI), el cual es una tecnología muy usada hoy en día en los sistemas de combustión de alta eficiencia como hornos, calderas y calentadores.

El control de temperatura de la marmita funciona como un control ON-OFF, este funciona con un PLC que enciende o apaga el control de ignición, el cual envía las órdenes respectivas a la válvula de gas, la superficie caliente y el sensor de llama. El control de temperatura (control de ignición de superficie caliente y PLC) cumple con las siguientes funciones:

- Indicación de temperatura, presión y tiempo de operación.
- Selección de temperatura límite.
- Configuración de intervalo de respuesta

El controlador de ignición incluye 6 lengüetas de programación, según el número de intentos y tiempo de encendido de la superficie caliente, para la marmita se seleccionó una lengüeta con dos intentos y un tiempo de encendido de 7 segundos de la superficie caliente.

7.2.2 Diseño intercambiador de calor. El intercambiador tiene como objetivo aprovechar el calor generado por los gases de combustión (producidos por los tres quemadores de gas) para calentar agua y generar vapor dentro de la marmita autogeneradora de vapor. El intercambiador tiene una parte dinámica (gases que fluyen desde la cámara de combustión, a través de los tubos, la chaqueta de gases y salen por el ducto de escape) y una parte estática (agua de vaporización).

Para el diseño del intercambiador de calor se tomó como condición inicial de diseño que el conjunto de generación de vapor (cámara de combustión e intercambiador de calor) ocupará un volumen igual o inferior al 50% de la altura total del cuerpo de la marmita y que el recipiente del producto ocupara el otro 50%, además que se seleccionó el intercambiador que requiriera la menor cantidad de agua para sumergir totalmente el conjunto de generación, y que tuviera el mayor área de transferencia de calor.

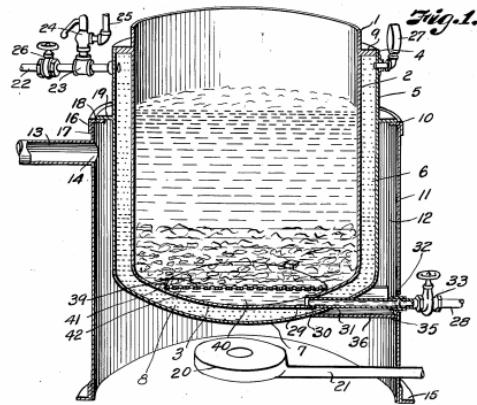
Para el diseño geométrico de intercambiador se analizaron una gran variedad de intercambiadores de calor presentes en los diferentes modelos desde los más básicos hasta los más complejos, en donde los más significativos fue el modelo desarrollado por Cleveland, que se caracteriza por una serie de tubos de calor que atraviesan el agua de calentamiento y un modelo escalado del intercambiador desarrollado por la corporación CDT de Gas, que se caracteriza por un ducto de gases calientes (cámara de combustión-zona de radiación) que atraviesan el agua de calentamiento y una chaqueta de gases que la rodean (zona de convección), este modelo se escaló para la nueva capacidad propuesta en el proyecto que es una marmita de 40 galones.

Tabla 14. Diferentes modelos de intercambiador de calor en marmitas para el diseño del nuevo intercambiador de calor

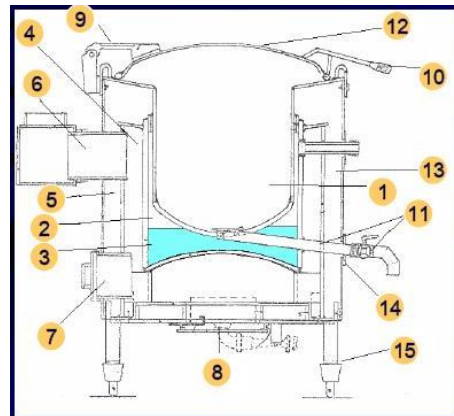
Modelos de intercambiador para el nuevo prototipo de marmita

Modelo tradicional en marmitas autogeneradoras de vapor (Doble chaqueta).

Consiste en una chaqueta de vapor y una chaqueta de gases de combustión. Desarrollado por H.L. Corbet en 1952.



Modelo utilizado por Pallomaro. Es el mismo principio del modelo tradicional, a diferencia que la cámara de combustión es de forma semiesférica para resistir la presión de operación con una lámina de menor espesor.



El modelo desarrollado por Edward Kells en 1952 es una variante del modelo tradicional que se caracteriza por agregar un conjunto de aletas en una cámara de combustión toriesférica para aumentar el área de transferencia de calor

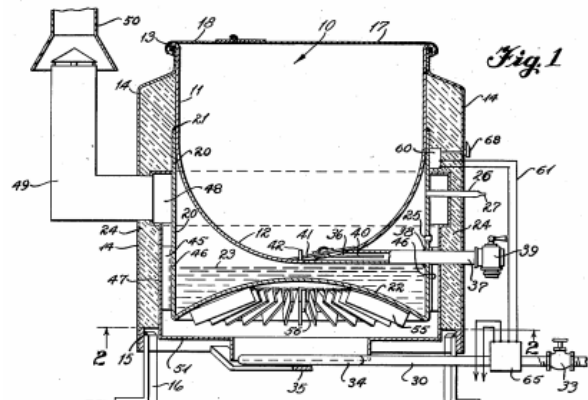
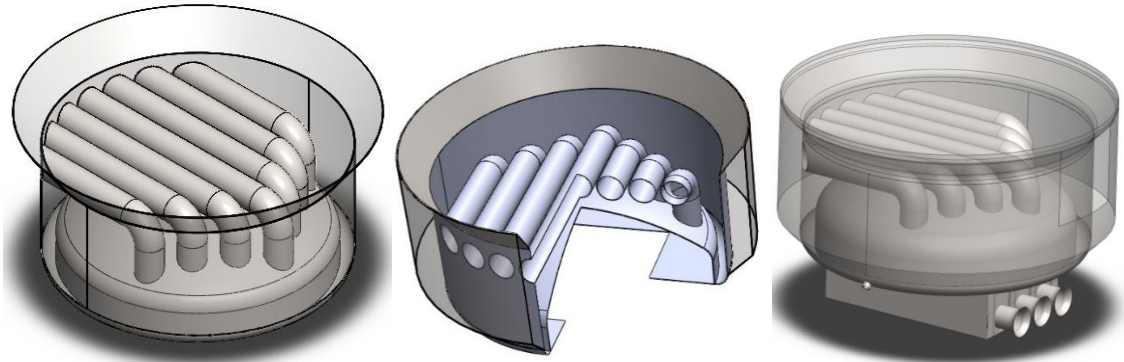


Tabla 15. Características geométricas principales de cada diseño

Consideración	Primer prototipo de marmita escalado	Prototipo Cleveland	Prototipo Final
Relación Vreal/Vóptimo de la cámara de combustión	0,83	0,94	1
Volúmen de agua mínima a contener [lts]	24	28	33
Diámetro exterior total [cm]	71	71	71
Altura Total [mm]	320	300	349
Área total de transferencia de calor [m²]	0,882	1,270	1,581

Por tal motivo se desarrolló una nueva geometría para el intercambiador de calor, en donde se modificó el primer prototipo cambiando el ducto de calor por una serie de 7 tubos de calor de 2 pulgadas de diámetro (representan aproximadamente el 48% del área total de transferencia en el primer prototipo), que maximizan el área de transferencia de los gases de combustión al agua a calentar, conservando el área transversal de evacuación de los gases de combustión. Además, se modificó la cámara de combustión utilizada en el modelo de Cleveland (superficie plana), por una cámara de combustión de cabeza tipo tori esférica, la cual disminuye el espesor de lámina a un calibre 12, y principalmente, aumenta el área de transferencia de calor, lo cual es muy importante teniendo en cuenta que es en la cámara de combustión donde los gases de combustión y la llama de los quemadores entregan la mayor energía térmica al agua de calentamiento.

Figura 18. Propuesta final de intercambiador para el nuevo prototipo de marmita



Conceptualmente, el intercambiador descrito está conformado por dos cámaras (1: la cámara de combustión, 2: la chaqueta de gases) unidas por una serie de tubos que transfieren los gases de combustión desde 1 a 2. Este diseño se conoce como “pirotubular” porque los gases de combustión van dentro de los tubos, y el fluido que se está calentando (en este caso: agua para generar vapor) está por fuera de los tubos.

7.2.2.1 Partes que componen el intercambiador de calor:

- **Cámara de combustión:** Comprende el espacio ocupado por el combustible y los productos intermedios de combustión durante la combustión, el cual es proporcional al tiempo de residencia de los reactivos. En la parte superior la cámara de combustión tiene una serie de agujeros. En cada agujero se solda un codo y un tubo que permitirá evacuar los gases de combustión. La disposición de los agujeros es simétrica, y están ubicados a un solo costado de la cámara.
- **Tubos de calor:** Son tubos de sección circular, cada uno unido por soldadura con su respectivo codo de 90°, que están ubicados en la parte superior de la cámara de combustión. Los tubos están alineados de forma paralela, horizontal, y simétricos. Al área transversal de los tubos se determina de tal forma que permita evacuar los gases de combustión que se están generando

en la cámara de combustión. En esta configuración los gases de combustión fluyen a través de cada uno de los tubos en una misma dirección.

- **Recipiente de agua de vaporización:** El conjunto de cámara de combustión y tubos de calor está inmerso dentro de un recipiente cilíndrico. Este recipiente cilíndrico tiene fondo plano, y en su extremo superior, una sección cónica. Este recipiente contiene agua que al calentarse genera el vapor requerido por la marmita autogeneradora. El nivel de agua requerido debe cubrir completamente todos los tubos de calor. En un costado, el recipiente lleva una serie de agujeros que están dispuestos a la misma altura, por cada uno de estos agujeros saldrá un tubo de calor.
- **Chaqueta de gases.** El recipiente que contiene el agua para vaporización está rodeado por una sección cilíndrica o “chaqueta”. El espacio anular entre el recipiente de agua de vaporización, y la propia chaqueta de gases, define la cámara 2.

7.2.3 Modelo de transferencia de calor: El modelo matemático se realizó de acuerdo a los requerimientos de potencia para realizar el proceso de calentamiento deseado. Además se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La temperatura del agua en el recipiente será la misma en todos los puntos para cualquier t.
- La temperatura de entrada de los gases se considera como a temperatura de llama adiabática
- Paredes son isotérmicas
- Los gases de combustión son transparentes a la radiación, excepto en la cámara de combustión (zona de radiación)
- Se realizará un modelo cero dimensional
- Propiedades de los sólidos constantes (láminas de acero inoxidable y aislamiento térmico), calor específico de las paredes de acero inoxidable es de $510 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
- Los calores específicos del agua líquida, vapor de agua y aire constantes.
- Fase gaseosa (aire y vapor de agua) se considera una perfecta composición de gas (Masa molar del aire= $0,029 \text{ kg/mol}$ y fracción molar del vapor= $0,018 \text{ kg/mol}$).

El comportamiento en la chaqueta de vapor es complejo debido a que hay muchos fenómenos ligados en condiciones inestables. Se proponen para la solución de este problema, las siguientes hipótesis: La principal hipótesis de este modelo es que el compartimiento en fase gaseosa dentro de la chaqueta de vapor es casi homogénea en términos de temperatura y composición, excepto en la proximidad de las paredes internas y donde el calor y las capas límite de transferencia de masa aparecería. Una temperatura del agua homogénea en el intercambiado de calor fue también asumida, debido a su conductividad térmica relativamente alta y a que la circulación de agua surge de la convección libre y/o de la ebullición.

$$H_v(t) = (m_v(t) * Cp_v) * T_v(t)$$

$$H_l(t) = m_l(t) * (Cp_l * T_l(t) - \Delta H_o)$$

Se asumió volumen de vapor constante (esto no es estrictamente cierto debido a la dilatación térmica y la variación en la masa y densidad del agua líquida²⁴)

$$P_v(t) = \frac{m_v(t) * R * (T_g(t) + 273)}{M_v * V_v}$$

$$X_a(t) = \frac{m_a}{m_a + m_v(t)}$$

$$X_v(t) = 1 - X_a(t)$$

$$\rho_g(t) = \frac{m_v(t) + m_a}{V_g}$$

$$P(t) = P_a(t) + P_v(t)$$

La Temperatura en el punto de rocío y la temperatura de saturación se obtiene de la presión parcial del vapor de agua. Correlación propuesta por Nadeau y Puiggali (1995).

$-12psig < P(t) < 30psig$ (En Pascales para el modelo matemático), limitado por a válvula de seguridad de la marmita.

²⁴ RICHARD Rocca-Polimeni, DENIS Flick y JEAN Vasseur. A model of heat and mass transfer inside a pressure cooker. Journal of Food Engineering 107 (2011) 393–404

$$T_{dew}(t) = \frac{1}{\sqrt{7,242 \times 10^{-5} + 4,476 \times 10^{-6} [23,3265 - \ln(P_v(t))]} - 8,51 \times 10^{-3}} - 273$$

$$T_{sat}(t) = \frac{1}{\sqrt{7,242 \times 10^{-5} + 4,476 \times 10^{-6} [23,3265 - \ln(P(t))]} - 8,51 \times 10^{-3}} - 273$$

Transición de la convección natural a la ebullición en la pared del intercambiador de calor; Perry et al., 1997; Mayinger and Hollborn, 1977.

$$si, T_l(t) < T_{sat}(t)$$

$$\dot{m}_{evap} = A_{IC} * k_{l \rightarrow g} * (\rho_{vsat}(t) - \rho_v);$$

$$si, T_l(t) \geq T_{sat}(t)$$

$$\dot{m}_{boil} = \gamma(T_{iIC}(t) - T_{sat}(t))$$

$$\rho_v(t) = \frac{m_v(t)}{V_g}$$

$$q_{boil} = 20 * A_{IC} * (T_{iIC}(t) - T_{sat}(t))^{3,43}$$

$$\frac{dm_v}{dt} = -\dot{m}_{cond \rightarrow icha} - \dot{m}_{cond \rightarrow irec} + \dot{m}_{boil} + \dot{m}_{evap}$$

$$\frac{dm_l}{dt} = \dot{m}_{cond \rightarrow icha} + \dot{m}_{cond \rightarrow irec} - \dot{m}_{boil} - \dot{m}_{evap}$$

$$\frac{dH_l}{dt} = \max(q_{iIC \rightarrow l}; q_{boil}) - q_{l \rightarrow g} - \dot{m}_{evap} * Cp_v * T_l(t) - \dot{m}_{boil} * Cp_v * T_{sat}(t) + \dot{m}_{cond \rightarrow icha} * (Cp_{inox} * T_{icha}(t) - \Delta H_0) + \dot{m}_{cond \rightarrow irec} * (Cp_{inox} * T_{irec}(t) - \Delta H_0)$$

$$\frac{dH_g}{dt} = q_{l \rightarrow g} - q_{g \rightarrow icha} - q_{g \rightarrow irec} + \dot{m}_{evap} * Cp_v * T_l(t) + \dot{m}_{boil} * Cp_v * T_{sat}(t) - \dot{m}_{cond \rightarrow icha} * Cp_v * T_g(t) - \dot{m}_{cond \rightarrow irec} * Cp_v * T_g(t)$$

$$q_{iIC \rightarrow l} = h_{iIC \rightarrow l} * A_{IC} * (T_{iIC}(t) - T_l(t))$$

$$q_{g \rightarrow irec} = h_{g \rightarrow irec} * A_{rec} * (T_g(t) - T_{irec}(t))$$

$$q_{l \rightarrow g} = A_{transch} * h_{l \rightarrow g} * (T_l(t) - T_g(t))$$

$$q_{g \rightarrow ichaq} = A_{chaq} * h_{g \rightarrow ichaq} * (T_g(t) - T_{ichaq}(t))$$

$$q_{ilc \rightarrow l} = m_l * C_{v_l} * \frac{dT_l}{dt}$$

Condensación: Por medio de la siguiente ecuación se puede observar la influencia de la concentración de aire en el coeficiente de transferencia de calor por condensación del vapor. Chin et al. (1994).

$$k_{air} = \frac{1}{2} * [\exp(-47,7294 * X_a^{0,6246}) + \exp(-2,8235 * X_a^{0,3533})]$$

Minkowycz y Sparrow (1996) propusieron la siguiente ecuación para predecir el coeficiente de transferencia de calor en la condensación

$$h_{cond \rightarrow ichaq}(t) = 0,815 * k_{air} * \left(\frac{\lambda_l^3 * \rho_l(t) * (\rho_l(t) - \rho_g(t)) * g * \Delta \hat{H}_v}{\mu_l (T_{sat}(t) - T_{ichaq}(t)) * l} \right)^{1/4}$$

$$\dot{m}_{cond \rightarrow ichaq} = \frac{A_P * h_{cond \rightarrow ichaq}(t) * (T_{dew}(t) - T_{ichaq}(t))}{\Delta \hat{H}_v}$$

$$\Delta q_{cond \rightarrow ichaq} = \dot{m}_{cond \rightarrow ichaq} * [\hat{H}_v(T_g) - \hat{H}_l(T_{ichaq})]$$

$$\hat{H}_v(T_g) = C_{p_v} * T_g(t)$$

$$\hat{H}_l(T_{ip}) = -\Delta \hat{H}_0 + C_{p_w} * T_{ichaq}(t)$$

$$h_{cond \rightarrow irec}(t) = 0,815 * k_{air} * \left(\frac{\lambda_l^3 * \rho_l * (\rho_l - \rho_g) * g * \Delta \hat{H}_v}{\mu_l (T_{sat} - T_{irec}(t)) * l} \right)^{1/4}$$

$$\dot{m}_{cond \rightarrow irec} = \frac{A_{rec} * h_{cond \rightarrow irec}(t) * (T_{dew}(t) - T_{irec}(t))}{\Delta \hat{H}_v}$$

$$\Delta q_{cond \rightarrow irec} = \dot{m}_{cond \rightarrow irec} * [\hat{H}_v(T_g) - \hat{H}_l(T_{irec})]$$

$$\hat{H}_v(T_g) = C_{p_v} * T_g(t)$$

$$\hat{H}_l(T_{irec}) = -\Delta\hat{H}_0 + C_{p_{rec}} * T_{irec}(t)$$

Balance de energía en el recipiente

$$\frac{dT_{erec}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{rec} * th_{rec} * \rho_{rec} * C_{p_{rec}}} * \left(\frac{\lambda_{rec}}{th_{rec}} * (T_{irec} - T_{erec}) - q_{erec \rightarrow prod} \right)$$

$$\frac{dT_{irec}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{rec} * th_{rec} * \rho_{rec} * C_{p_{rec}}} * \left[q_{g \rightarrow irec} - \frac{\lambda_{rec}}{th_{rec}} * (T_{irec} - T_{erec}) + \Delta q_{cond \rightarrow irec} \right]$$

$$q_{erec \rightarrow prod} = h_{prod} * A_{rec} * (T_{prec}(t) - T_{prod}(t))$$

$$q_{erec \rightarrow prod} = m_{prod} * C_{v_{prod}} * \frac{dT_{prod}}{dt}$$

Balance de energía para la chaqueta de vapor

$$\frac{dT_{echaq}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{chaq} * th_{chaq} * \rho_{chaq} * C_{p_{chaq}}} * \left(\frac{\lambda_{chaq}}{th_{chaq}} * (T_{ichaq} - T_{echaq}) - q_{erec \rightarrow amb} \right)$$

$$\frac{dT_{ichaq}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{chaq} * th_{chaq} * \rho_{chaq} * C_{p_{chaq}}} * \left[q_{g \rightarrow ichaq} - \frac{\lambda_{chaq}}{th_{chaq}} * (T_{ichaq} - T_{echaq}) + \Delta q_{cond \rightarrow ichaq} \right]$$

$$q_{g \rightarrow ichaq} = h_{g \rightarrow ichaq} * A_{chaq} * (T_{ichaq}(t) - T_g(t))$$

$$q_{echaq \rightarrow amb} = h_{echaq \rightarrow amb} * A_{chaq} * (T_{echaq}(t) - T_{amb})$$

Balance de energía en los gases de combustión en la chaqueta de gases

$$\dot{m}_{gcomb} * C_{p_{gcomb}} * T_{gcomb in} - \dot{m}_{gcomb} * C_{p_{gcomb}} * T_{gcomb out} - q_{gcomb \rightarrow eIC} - q_{gcomb \rightarrow iaisl2} = M_g * C_{vg} * \frac{dT_{gcomb}(t)}{dt}$$

$$q_{gcomb \rightarrow eIC} = h_{gcomb} * A_{IC} * (T_{gcomb}(t) - T_{iIC}(t))$$

$$q_{gcomb \rightarrow iaisl2} = h_{gcomb} * A_{iaisl2} * (T_{gcomb}(t) - T_{iaisl2}(t))$$

$$T_{gcomb}(t) = \frac{T_{gcomb in} + T_{gcomb out}}{2}$$

$$T_{gcombout} = 2T_{gcomb}(t) - T_{gcombin}$$

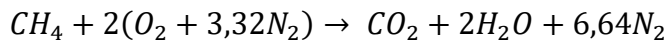
Masa de combustible utilizado para el proceso

$$\bar{q}_{iCH_4}^{\circ} = 802,2 \frac{kJ}{mol} * \frac{1}{0,016} \frac{mol}{kg} = 50137,5 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{Pot_{quemadores}}{PCI_{CH_4}} = \frac{29,17 \frac{kJ}{s}}{50137 \frac{kJ}{kg}} = 5,818 \times 10^{-4} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$m_{CH_4} = 0,698 \left[kg \right] \rightarrow \text{para } \Delta t = 20 \text{ min}$$

Estequiometria de la combustión – combustible metano-para un kilogramo de metano



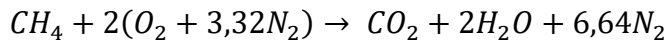
Para una masa de CH_4 de 0,698 [kg/s] se tiene:

$$M_{gcombustión} = M_c * (1 + 2 + 6,64)$$

$$M_{gcombustión} = 6,729 \left[kg \right] \rightarrow \text{para } \Delta t = 20 \text{ min}$$

$$\dot{m}_{gcombustión} = 5,607 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Temperatura de llama adiabática



Entalpía de los reactivos a $T_R = 298 \text{ k}$

$$H_{reactivos} = 1 * (-74,831) + 2 * (0) + 6,64 * (0) = -\frac{74,831kJ}{mol}$$

$$H_{productos} = 1 * \left[-393,546 + \int_{298}^{T_{ad}} C_{PCO_2} dT \right] + 2 * \left[-241,845 + \int_{298}^{T_{ad}} C_{PH_2O} dT \right] \\ + 6,64 * \left[0 + \int_{298}^{T_{ad}} C_{PN_2} dT \right]$$

El proceso de iteración finaliza cuando $H_{reactivos} = H_{productos}$

$T_{adiabatica}$	$H_{productos}$	$H_{reactivos}-H_{productos}$
2200	-130,88	56,05
2300	-87,49	12,65
2400	-42,75	-32,07

$$T_{adiabatica} = 2329,17 \text{ K}$$

$$T_{gcombin} = T_{adiabatica}$$

Balance de energía para el intercambiador de calor

$$\frac{dT_{eIC}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{IC} * th_{IC} * \rho_{IC} * Cp_{IC}} * \left(q_{gcom \rightarrow eIC} - \frac{\lambda_{IC}}{th_{IC}} * (T_{eIC} - T_{iIC}) \right)$$

$$\frac{dT_{iIC}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{IC} * th_{IC} * \rho_{IC} * Cp_{IC}} * \left[\frac{\lambda_{IC}}{th_{IC}} * (T_{eIC} - T_{iIC}) - \max(q_{iIC \rightarrow l}; q_{boil}) \right]$$

$$q_{iIC \rightarrow l} = A_{IC} * h_{iIC \rightarrow l} * (T_{iIC}(t) - T_l(t))$$

Balance de energía en el aislamiento inferior (chaqueta de gases de combustión)

$$\frac{dT_{eaisl2}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{aisl2} * th_{aisl2} * \rho_{aisl2} * Cp_{aisl2}} * \left(\frac{\lambda_{aisl2}}{th_{aisl2}} * (T_{iaisl2} - T_{eaisl2}) - q_{eaisl2 \rightarrow amb} \right)$$

$$\frac{dT_{iaisl2}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{aisl2} * th_{aisl2} * \rho_{aisl2} * Cp_{aisl2}} * \left[q_{gcomb \rightarrow iaisl2} - \frac{\lambda_{aisl}}{th_{aisl}} * (T_{iaisl2} - T_{eaisl2}) \right]$$

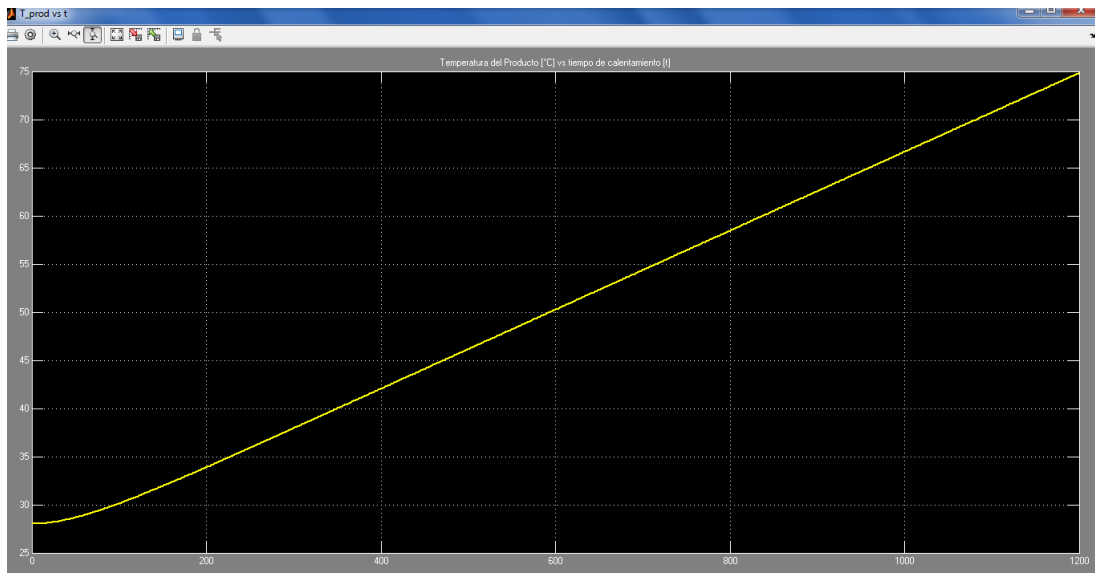
Balance de energía en el aislamiento superior (Chaqueta de vapor)

$$\frac{dT_{eaisl2}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{2} * A_{aisl2} * th_{aisl2} * \rho_{aisl2} * Cp_{aisl2}} * \left(\frac{\lambda_{aisl}}{th_{aisl}} * (T_{iaisl} - T_{eaisl}) - h_{eaisl \rightarrow amb} * A_{aisl} * (T_{eaisl} - T_{amb}) \right)$$

$$\frac{dT_{iaisl}}{dt} = \left(\frac{1}{\frac{1}{2} * A_{chaq} * th_{aisl} * \rho_{aisl} * Cp_{aisl}} \right) * \left[\Delta q_{conde \rightarrow ichaq} - h_{vichaq} * A_{chaq} * (T_{iaisl} - T_v) - \frac{\lambda_{aisl}}{th_{aisl}} * (T_{iaisl} - T_{eaisl}) \right]$$

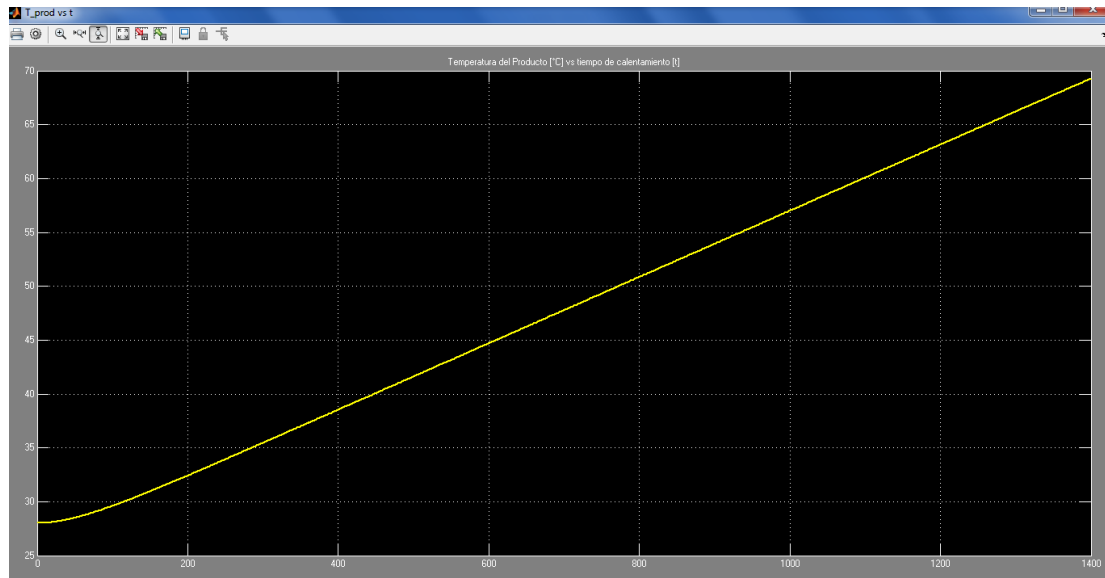
El modelo de transferencia de calor se realizó en Simulink de Matlab en donde se puede observar el tiempo de calentamiento del modelo escalado del primer prototipo y del modelo final de la marmita, esto teniendo como base las áreas de transferencia del intercambiador de calor y el agua contenida en este. Los buenos tiempos de transferencia de calor se debe en gran parte a la transferencia de calor por condensación, lo que verifica las ventajas de realizar el calentamiento con vapor en vez de agua caliente.

Figura 19. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo final.



Los resultados obtenidos por el modelo matemático muestran que el tiempo de calentamiento del producto de 30°C a 70°C es de 1050 segundos lo que representa una potencia útil del 21 kW es decir una eficiencia de calentamiento en el rango del 70% para una potencia de suministro de 30 kW.

Figura 20. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo escalado del primer prototipo.



Por otro lado para el caso del modelo escalado del primer modelo se obtuvo una eficiencia de calentamiento de 58%, a pesar que la configuración geométrica del primer prototipo se conserva para este cálculo se puede observar un aumento de la eficiencia gracias al nivel adecuado de agua en el intercambiador de calor y principalmente al aumento del área de transferencia entre el vapor y el producto, comportamiento que se puede observar con el aumento de la eficiencia energética para los modelos de marmita de 40 galones con respecto a los de 20 galones.

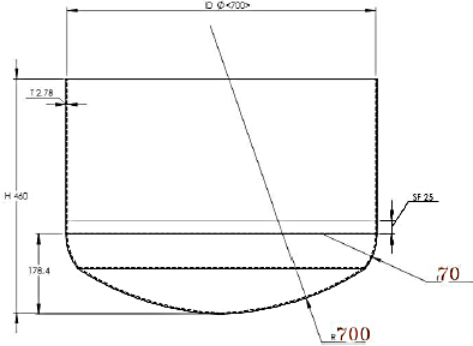
7.3 DISEÑO GEOMÉTRICO DEL RECIPIENTE DEL PRODUCTO

Para dimensionar el recipiente del producto se tomó la misma condición de diseño del intercambiador de calor, así que la altura total del recipiente es igual al 50% de a altura total del cuerpo de la marmita. Para a altura total la estudiante de diseño industrial en su proceso de restricciones de diseño determinó que este tipo de productos no deben superar una altura de 1,2 metros teniendo en cuenta la altura promedio del ser humano.

Se seleccionó un recipiente cilíndrico con cabeza elipsoidal para evitar incrustaciones del producto, tener buen área de transferencia de calor y resistir la

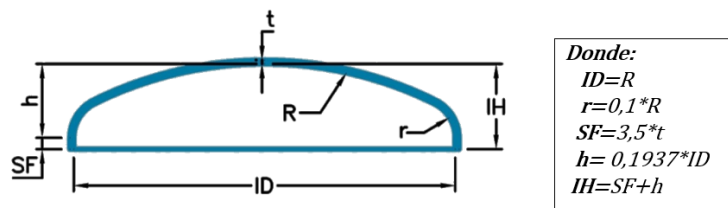
presión de diseño con un espesor de lámina calibre 12. Teniendo en cuenta que la capacidad de este recipiente es de 40 galones las dimensiones son las presentadas en la tabla 16.

Tabla 16. Dimensiones recipiente del producto

Recipiente	Material y medidas (mm)
	<p>Acero Inoxidable 304 Altura tota: 460 mm Diámetro: 700mm Espesor: 2,78 mm Pulido superficie interior</p>

Las dimensiones de la cabeza del recipiente se calcularon respecto a la norma ASME para fondo tipo standard flange al igual que para la cámara de combustión.

Figura 21. Dimensiones para cabezas tipo standard flange según ASME



7.4 DISEÑO DE LA CHAQUETA DE VAPOR

El diseño y fabricación de la chaqueta de vapor de la marmita se realizó en base a la norma ASME BPVC sección VIII – apéndice 9 en donde se proporciona los requisitos mínimos para el diseño hasta la inspección de la chaqueta de recipientes a presión. La porción de encamisado del recipiente se define como las paredes interior y exterior, los dispositivos de cierre, y todas las otras penetraciones o partes dentro de la camisa que se someten a tensiones de presión. El apéndice utilizado

supone que la chaqueta es una cámara de presión integral la cual se ajusta a un recipiente para uno o más fines entre los cuales se encuentra el calentar el recipiente y su contenido acto para diseño.

Para el diseño de la chaqueta de vapor se tiene en cuenta que el volumen específico se define como el volumen que ocupa una unidad de masa de un gas, lo que equivale al inverso de la densidad de dicho gas.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

La presión de la marmita autogeneradora está restringida por una válvula de seguridad de 30 psig, por lo tanto la temperatura que alcanza a condiciones de saturación es 134,474°C. El agua líquida contenida a esta misma condición, tiene un volumen específico de 0,001062 m³/kg es decir una densidad de 931,966 kg/m³, así mismo a esta condición de saturación el volumen específico del vapor es de 0,6115 m³/kg (1,635 kg/m³).

Esta ecuación es muy importante para el diseño de la chaqueta de vapor, ya que indica que la masa contenida en un volumen determinado y de igual forma la tasa de evaporación (\dot{m}) es directamente proporcional al volumen ocupado, es decir cuanto menor sea el volumen de la chaqueta de vapor, menor cantidad de masa y por lo tanto menor energía latente necesaria para lograr llevar la masa de agua a la condición de saturación, teniendo en cuenta que el agua líquida funciona como sumidero almacenador de energía.

Para el volumen de la chaqueta de vapor también se tiene en cuenta que idealmente la tasa de evaporación es igual a la de condensación.

$$m = \frac{V_{vapor}}{v_{vapor}} = \frac{V_{agua}}{v_{agua}}$$

$$\frac{1m^3}{0,6115 \frac{m^3}{kg}} = \frac{V_{agua}}{1,073 \times 10^{-3} \frac{m^3}{kg}}$$

$$V_{agua} = 1,76 \text{ litros}$$

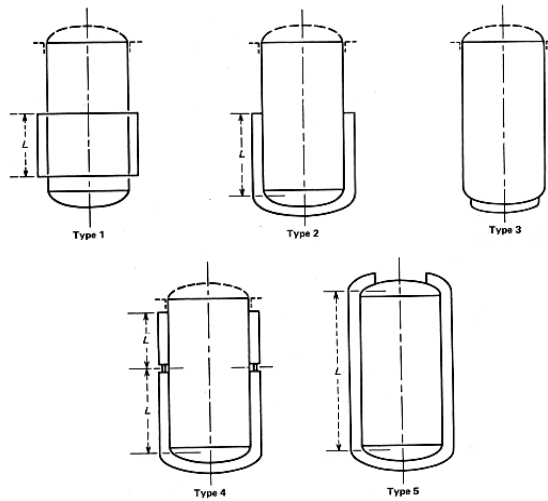
Es decir, por cada m³ geométrico de la chaqueta de vapor, se necesita sólo 1,76 litros de agua líquida contenida, esta condición está restringida por el intercambiador de calor y la cámara de combustión, ya que en realidad, para que no se genere un recalentamiento deberá mantenerse un nivel de agua por encima de la superficie de intercambio de calor; en este caso, la cámara de combustión y los tubos de calor deberán estar inmersos, por tal razón cuanto menor volumen geométrico ocupen estos elementos la tasa de transferencia de calor será más alta. Otra consideración muy importante es que la chaqueta de vapor, en lo posible debe rodear la mayor superficie posible del recipiente que contiene el producto, ya que de esta forma se aumenta la velocidad de transferencia de calor del vapor hacia éste.

7.4.1 Tipos de recipientes encamisados

La ASME BPVC es aplicable a recipientes encamisados en donde la chaqueta cubre la parte cilíndrica o cabeza, así como chaquetas parciales como se ilustra en figura 21. La chaqueta debe ser continua circunferencialmente para los tipos 1, 2, 4 o 5 mostradas y habrá una sección transversal circular para tipo 3. El uso de cualquier combinación de los tipos de muestra está permitido.

El diseño deberá cumplir con los requisitos aplicables de la subsección A (espesor de la cabeza, cargas internas y externas a los diferenciales de expansión a temperatura de diseño), los tanques revestidos pueden ser diseñados utilizando superficies como se da en la UG-47 siempre que la pared de la chaqueta, además de cumplir los requisitos de la UG-47 (a) también cumpla con los requisitos aplicables de la UG-27 (c) y (d) y UG-32.

Figura 22. Algunos tipos aceptables de chaqueta.



Fuente: ASME BPVC sección VIII

- ✓ Tipo 1. Chaqueta de una longitud definida confinada por completo a un casco cilíndrico.
- ✓ Tipo 2. Chaqueta que cubre una parte del casco cilíndrica y una de las cabezas.
- ✓ Tipo 3. Chaqueta que cubre una parte de la cabeza.
- ✓ Tipo 4. Chaqueta con adición de estancia o anillos ecualizadores de la parte cilíndrica del casco para reducir la longitud efectiva.
- ✓ Tipo 5. Chaqueta cubriendo completamente la parte cilíndrica y las cabezas.

En las marmitas de vapor directo el doble fondo o chaqueta por lo general tienen la misma forma que el recipiente de producto, a pesar de que la marmita autogeneradora tiene una chaqueta con una configuración un poco diferente debido a que requiere de un recipiente para contener el agua de evaporización fue apropiado seleccionar una chaqueta Tipo 2, a una altura de 2/3 del recipiente (2/3 jacketed).

7.4.2 Diseño del elemento de cierre de la chaqueta al recipiente.

Los cierres del tipo mostrado en la Figura 22 bocetos (b-1), (b-2), y (b-3) tendrán t_{rc} al menos igual a t_{rj} . Además no será menos de lo siguiente:

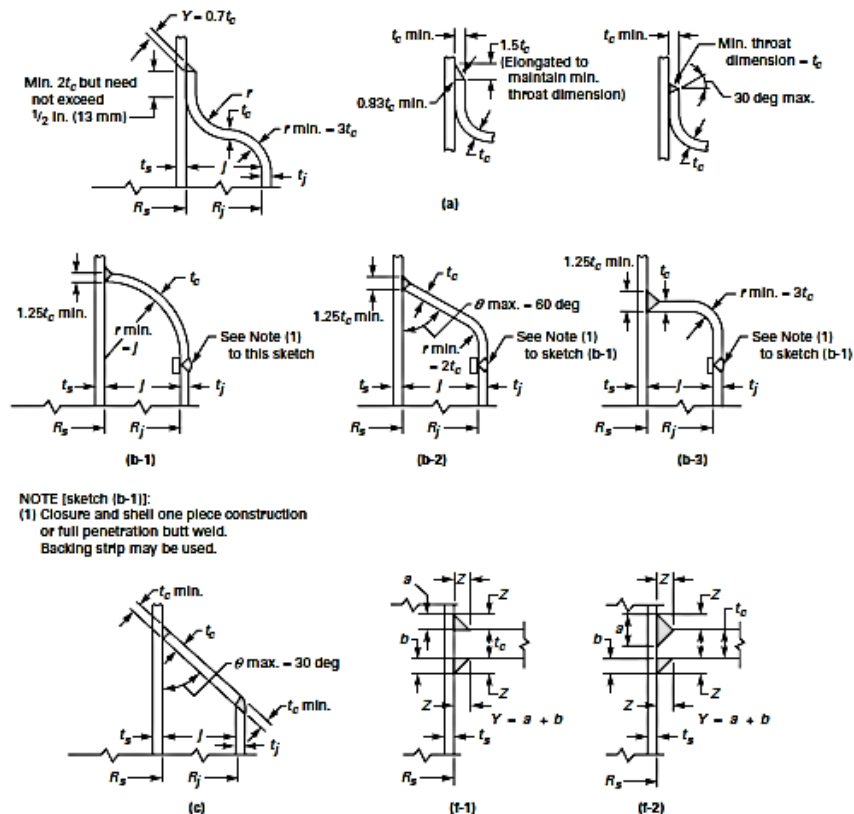
$$t_{rc} = 0,707j\sqrt{P/S}$$

Los coeficientes de estas fórmulas incluyen un factor que aumenta efectivamente la tensión admisible para dicha construcción a 1,5 S.

$$t_{rc} = 2t_{rj}$$

$$t_{rc} = 0,707j\sqrt{P/S}$$

Figura 23. Algunos tipos aceptables de los cierres de la chaqueta



Fuente: ASME BPVC sección VIII

El cierre de la chaqueta se realizó en base al estilo (b-2) a un ángulo de 45° soldado circunferencialmente solo en la parte unida con el recipiente ya que la pestaña fue

un doblez de la misma lámina de la chaqueta de tal forma que se obtuvo un cierre sencillo y completamente sellado. El espesor de la lámina para la chaqueta debe ser de calibre 14, se verificó en Solidworks y se estandarizó según las especificaciones de lámina disponible en el mercado nacional.

Tabla 17. Valores utilizados para el cálculo de espesores.

Símbolo	Valor sugerido por la norma	Valor utilizado
P diseño (ASME) Marmita caliente	50 psi	50 psi
T diseño ($T_{\text{sat a psat}}$) marmita caliente	-	138 °C
P diseño Marmita Fria	-	-15psi-g
T diseño Marmita fría	-	16,5°C
tc	1,7 [mm]	1.9 [mm]
θ	$\theta_{\text{máx}} = 60^\circ$	45°
R	$r_{\text{min}} = 3,8$ [mm]	5 [mm]
S (acero inoxidable 304 a 138°C)	-	1034Mpa

7.4.3 Monitor de la presión en la chaqueta de vapor

Uno de los requerimientos de control y seguridad para recipientes enchaquetados según el código ASME es la visualización de la presión interna en tiempo real.

7.4.3.1 Sensor-transmisor de presión.

La selección del instrumento para la medición de presión fue uno de los componentes más difíciles de encontrar ya que este debía cumplir con requerimientos muy específicos.

Tabla 18. Requerimientos del sensor-transmisor de presión

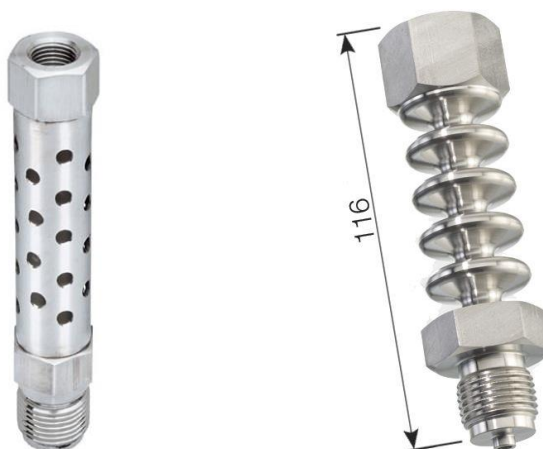
Fluido de medición	Vapor
Rango de medición	Vacío (-14,7psi) a 30psi
Temperatura de operación (rango)	Temperatura ambiente a 130°C

No se logró encontrar un transmisor que pudiera ser usado a tan altos rangos de temperatura, excepto con el uso de un tubo sifón o un cooling element los cuales son instrumentos muy usados en los manómetros y transmisores de presión utilizados para vapor que permiten proteger el medidor a temperaturas superiores a las de su operación y sin intervenir en la exactitud de la medición.

7.4.3.1.1 Cooling element

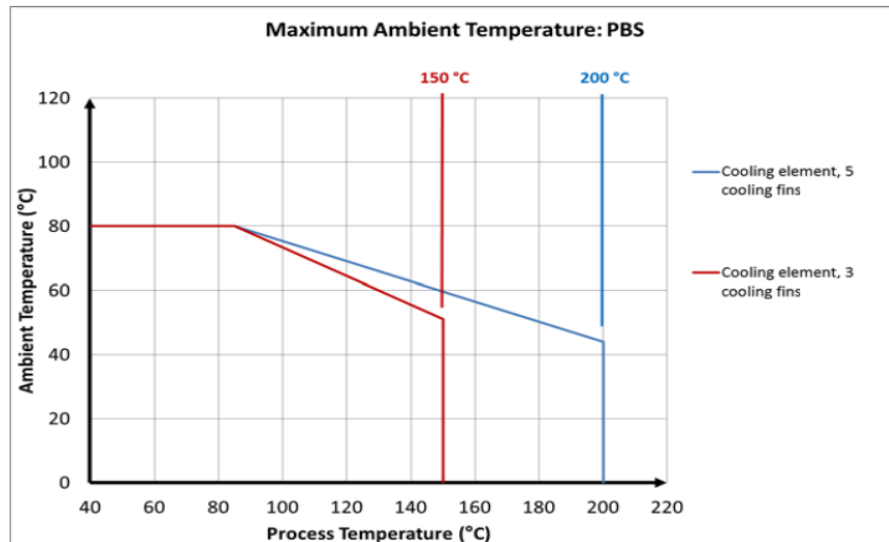
Es un accesorio que pone cierta distancia entre el transmisor de presión y el calor del proceso, consta de algunas aletas que permite la circulación del aire para disipar el calor. Enfrían el proceso hasta el rango de temperatura especificado para el transmisor de presión y de esta manera protege el transmisor en procesos donde se presenta alta temperatura.

Figura 24. Estilos de cooling element (Perforadas o con Aletas)



Fuente: www.dwyer-inst.com

Figura 25. Rango de temperatura del transductor de presión con un “cooling element”. Cuando la temperatura máxima de operación del transductor es 85°C.



Fuente: www.dwyer-inst.com

7.5 EVACUACIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

El cálculo del área necesaria para el ducto de evacuación se hace en base a la Norma Técnica Colombiana NTC 3833²⁵. De acuerdo a esta norma, el área se determina en función de la potencia instalada para el aparato de combustión, de acuerdo a tabla 19. La presión atmosférica de referencia es de 101,325 kPa. Sin embargo, es necesario ajustar este diámetro a condiciones locales. Para calcular el diámetro mínimo necesario a cualquier otra altura sobre el nivel del mar y teniendo en cuenta que el equipo trabajará a una potencia superior a 25 kW, ésta se corrige como

²⁵ Norma Técnica Colombiana **NTC 3567**. Conductos metálicos para la evacuación por tiro natural de los productos de la combustión del gas. Icontec. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/50157368/NTC3567>

Tabla 19. Diámetro interior mínimo del conector de evacuación directa a través de fachada para artefactos a gas del Tipo B.1.

Potencia Nominal del Artefacto [kW]	Diámetro interior mínimo de conector de evacuación a nivel del mar [mm]
$P \leq 11,5$	90
$11,6 \leq P \leq 17,5$	110
$17,6 \leq P \leq 24,0$	125
$24,1 \leq P \leq 31,5$	139
$31,5 \leq P$	175

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 3567

El cálculo del área necesaria para el ducto de evacuación se hace en base a la Norma Técnica Colombiana NTC 3833²⁶. De acuerdo a esta norma, el área se determina en función de la potencia instalada para el aparato de combustión, de acuerdo a tabla 19. La presión atmosférica de referencia es de 101,325 kPa. Sin embargo, es necesario ajustar este diámetro a condiciones locales. Para calcular el diámetro mínimo necesario a cualquier otra altura sobre el nivel del mar y teniendo en cuenta que el equipo trabajará a una potencia superior a 25 kW, ésta se corrige como

$$D_2 = D_1 \sqrt{\frac{P_{a \text{ nivel del mar}}}{P_{local}}}$$

Realizando la corrección, se calcula un ducto estándar de diámetro mínimo 6in. Y al igual que en el primer prototipo se diseña un conector de la chimenea en forma rectangular, con un área equivalente al ducto circular.

²⁶ Norma Técnica Colombiana **NTC 3567**. Conductos metálicos para la evacuación por tiro natural de los productos de la combustión del gas. Icontec. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/50157368/NTC3567>

Nota: Un área de evacuación de los gases de combustión adecuada garantiza un buen tiro de la chimenea. Si éste no se logra adecuadamente, es necesario aumentar la longitud de la chimenea.

7.6 VOLUMEN ÓPTIMO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

El volumen de la cámara de combustión depende del tiempo de residencia de los reactivos, del tipo de combustible, del diseño del quemador, de las presiones y velocidad de la corriente de gases. Este volumen varía considerablemente con el tipo de combustible, diseño del quemador, presiones y velocidades de la corriente de fluido y tipo de aplicaciones. En el caso de combustibles sólidos, su granulometría juega un papel importante en las dimensiones del hogar, así como también su humedad y la longitud de la llama. Al aumentar el valor de estos parámetros, se tiene que aumentar el volumen de la cámara.

Otro parámetro que influye en el dimensionado de las cámaras es la temperatura de las mismas, por lo tanto, las cámaras adiabáticas (paredes refractarias), tienen menor volumen que las cámaras con pared de agua.

Para el cálculo del volumen de la cámara se usa la siguiente expresión²⁷:

$$V = \frac{\dot{Q}_f * PCS}{I_v} = \frac{0,00057472 \frac{m^3}{s} * 40135,5972 \frac{kJ}{m^3}}{1030 \frac{kW}{m^3}} = 0,02912m^3$$

Donde:

\dot{Q}_f : Flujo de combustible (kg/s)

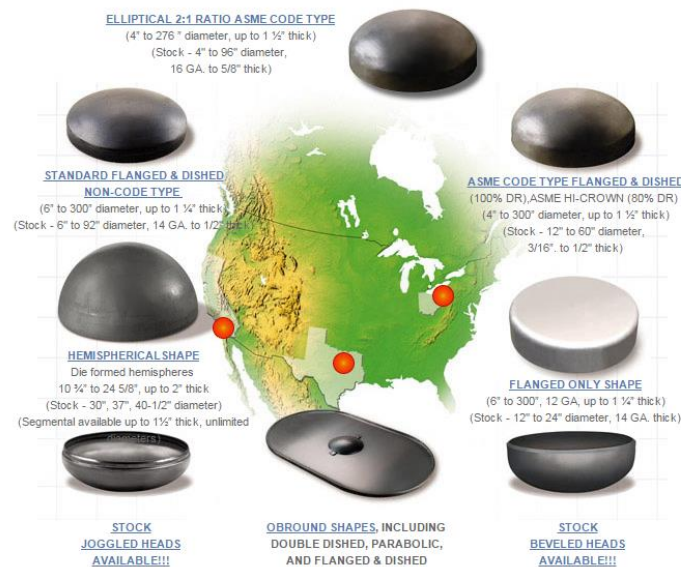
PCS: Poder calorífico superior (kJ/m³)

I_v : Factor empírico según el combustible: el cual relaciona la velocidad de energía que puede liberar el combustible por unidad de volumen de la cámara

²⁷ Colciencias. e-URE- Universidad Nacional de Colombia – Universidad Pontificia Bolivariana: Uso Racional de la Energía. Curso virtual. Disponible en <<http://www.si3ea.gov.co/Eure/3/inicio.html>>

El volumen de la cámara de combustión para el nuevo modelo de marmita debe ser de aproximadamente 30 litros. En el estado del arte se encontró algunos modelos que proponen una cámara de combustión plana y otros semiesférico, es claro que las superficies curvas soportan mayores rangos de presión que las superficies planas; se analizó la influencia de la presión de diseño (50 psig) en la cámara de combustión del primer prototipo (superficie plana calibre 7) y los diferentes modelos de cabeza para tanques, para definir el diseño de la cámara de combustión teniendo en cuenta el área superficial para la transferencia de calor y el espesor de la cabeza.

Figura 26. Diferentes modelos de cabezas para tanques



Fuente. <http://www.cmforming.com/tankheads-and-accessories.htm>

Para que el recipiente plano pueda resistir la presión de diseño requiere un espesor de 10mm, lo que va a afectar la transferencia de calor, por otro lado el recipiente semiesférico con tan solo un espesor de 1,2mm pero requiere una altura de 242 mm para un volumen de 30 litros.

Se propuso un recipiente toriesférico Standard flanged ASME, el cual requiere un calibre 12 de espesor, además que ofrece un área de transferencia muy similar al

del recipiente semiesférico y reduce entre 6 y 7 cm la altura la cámara de combustión, cabe resaltar que la marmita autogeneradora de vapor es un conjunto de muchas partes, así que cada centímetro ahorrado en altura es de vital importancia.

7.7 AISLAMIENTO TÉRMICO

Para el cálculo del aislamiento se tomó como frontera que la temperatura máxima de la superficie exterior de la marmita no debe exceder los 60°C según los requerimientos de la norma ASTM F1602. Por medio del modelo de transferencia de calor se verifica que un espesor superior a 1" permitirá que la temperatura de la cubierta exterior de la marmita no supere los 60°C como lo recomienda la norma. Se utilizó Rolloflex ($e = 1\frac{1}{2}$ " , $K = 0,035 W/mk$) como aislamiento térmico, el cual consiste en finas fibras de lana mineral de roca elástica, ya que presenta buenas características de conductividad, un alto rango de temperatura de operación y bajo costo.

8 PROCESO DE MANUFACTURA Y ENSAMBLAJE

El cuerpo principal de la marmita (recipiente, chaqueta de vapor, cámara de combustión, chaqueta de gases, chaqueta de aislamiento, chimenea y soportes) fue fabricado en el Taller O&N Ingeniería, de la ciudad de Bucaramanga, entre los meses de septiembre y octubre de 2015. Así mismo, se realizaron pruebas de hermeticidad (prueba neumática) en taller, para verificar la integridad de las soldaduras y la ausencia de fugas en el recipiente a presión (esta prueba se realizó a la presión de diseño (50 psi) y en un lapso de tiempo de 3 horas verificó que no existiera una caída de presión mayor al 2% de la presión de diseño).

Dos partes (recipiente y cámara de combustión) fueron importadas del fabricante JINAN MINGCHANG MANUFACTURE, de origen chino, debido a que las capacidades nacionales de manufactura de este tipo de componentes (head vessel) son limitadas.

Figura 27. Proceso de fabricación de la chaqueta de vapor



Figura 28. Proceso de fabricación del Intercambiador de calor



Los accesorios y elementos de control y seguridad, tren de gas y sistema de combustión, tren de vapor y componentes electrónicos fueron ensamblados en el Taller de Lácteos del Parque Tecnológico Guatigará, ubicado en Piedecuesta, Santander durante el mes de Noviembre de 2015.

Figura 29. Ensamblaje instrumentación de la marmita



Tabla 20. Lista de componentes cuerpo marmita

No.	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PROCESO DE FABRICACIÓN	MATERIAL
1	Recipiente	Casquete de perfil elipsoidal y sección cilíndrica -	Embutido en frío	Lámina Cal. 12 Acero Inox. 304
2	Chaqueta de vapor	Sección cilíndrica con borde superior rebordeado	Rolado y soldado	Lámina Cal. 14 Acero Inox. 304
3	Chaqueta de gases	Sección cilíndrica y sección cónica	Rolado y soldado	Lámina Cal. 14 Acero Inox. 304
4	Cámara de combustión	Casquete tipo ASME con sección cilíndrica	Embutido en frío	Lámina Cal. 12 Acero Inox. 304
7	Tubos de calor	Tubo de 2" de diámetro	Soldado	Acero Inox.
6	Recipiente de agua de vaporización	Sección cilíndrica	Rolado y soldado	Lámina Cal. 14 Acero Inox. 304
7	Chimenea	Diseño Industrial	Doblado y soldado	Lámina Cal. 22 Acero Inox. 304
8	Ducto de drenaje	Tubo de acero inoxidable	Soldado	Acero Inox.

Una vez ensamblado la marmita con todos sus componentes, se realizó el arranque, puesta a punto y pruebas preliminares de desempeño energético de acuerdo con el procedimiento estándar ASTM F1785.

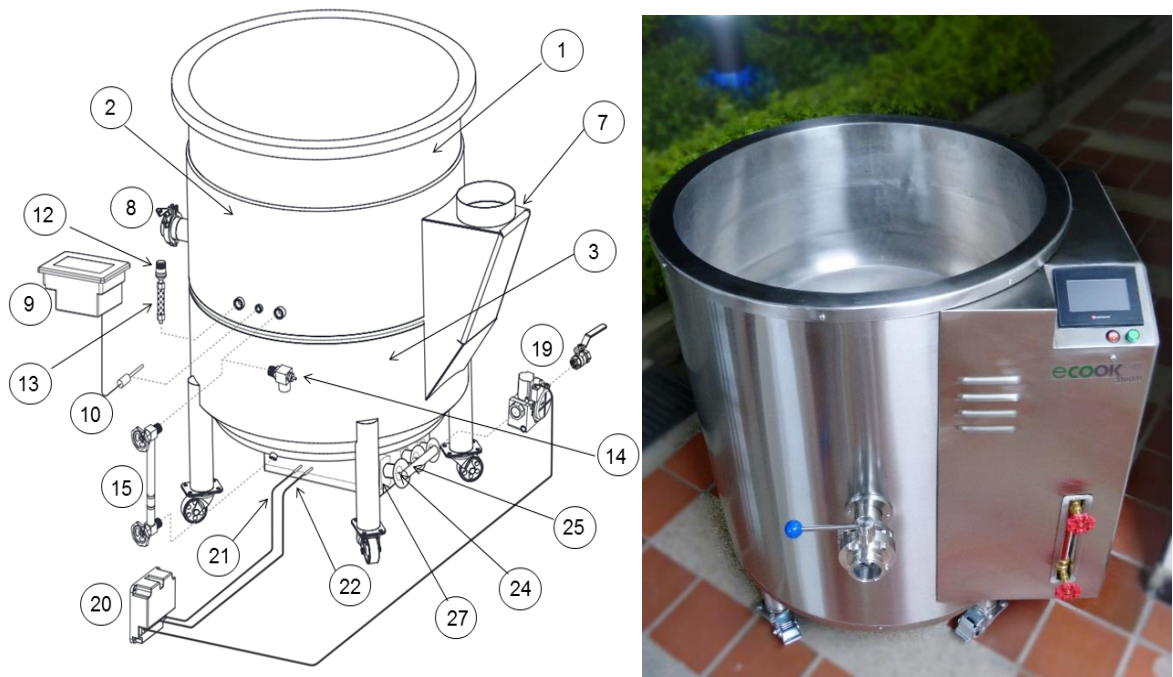
Tabla 21. Lista de componentes de control y seguridad

ELEMENTOS DE CONTROL Y SEGURIDAD				
No.	NOMBRE	FABRICANTE	REFERENCIA	CANT
9	PLC con HMI incorporada (Human-Machine Interface)	Unitronics	SM35-J-T20	1
10	RTD		PT100	1
11	Transmisor de temperatura		NA	1
12	Sensor-Transmisor de presión	Dwyer	673-13	1
13	Cooling tower	Dwyer	A-240-A	1
14	Válvula de seguridad	Apollo	RVS-52	1
15	Visor de nivel de agua		NA	1
16	Relé estado sólido	Ruike Electronic Industrial Co	SSR-40DA	1
17	Tarjeta de adquisición de datos	Sunyuan SZ	SYAD-02 ^a	1
18	Fuente de poder	Mean Well	MDR-20-24	2

Tabla 22. Lista de componentes tren de gas

TREN DE GAS - CONTROL DE COMBUSTIÓN Y SUPERVISIÓN DE LLAMA				
No.	NOMBRE	FABRICANTE	REFERENCIA	CANT
19	Válvula de gas slow opening - 2 Stage	White-Rodgers	36J55-214	1
20	Controlador de Ignición HSI Universal	White-Rodgers	50E47-843	1
21	Electrodo de ignición Hot Surface Ignitor HSI	White-Rodgers	21D64-2	1
22	Electrodo sensor de llama	White-Rodgers	760-401	1
23	Transformador 24V AC		NA	1
24	Inyector para gas natural	3/32	NA	3
25	Manifold distribuidor	CDT de GAS	NA	1
26	Manguera de gas		NA	1
27	Quemador de gas	Polidoro	Low NOx OVO S60	3

Figura 30. Partes principales y elementos de control y seguridad de la marmita



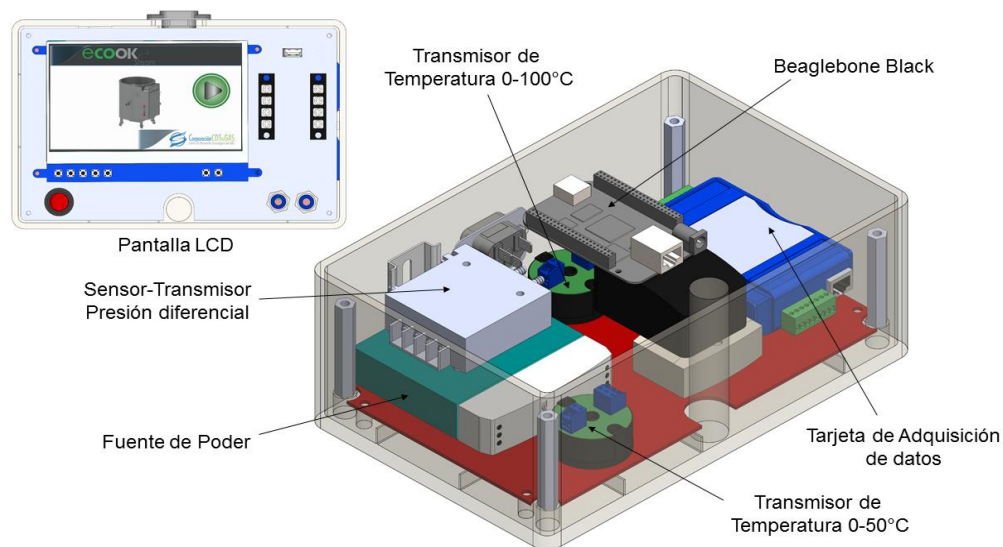
Fuente: CDT de Gas

8.1 MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Con el fin de facilitar los cálculos en las pruebas de rendimiento se optó por desarrollar un módulo para adquirir y visualizar los valores requeridos, con una tarjeta de adquisición Beaglebone Black y su respectiva pantalla LCD²⁸.

Para el cálculo de la energía de entrada es necesario realizar la corrección del volumen de gas medido por medio de los factores de corrección de temperatura y presión, por lo que se requiere un monitoreo constante de la temperatura y presión de gas de suministro de la marmita, para ello se instaló un medidor de presión y temperatura antes del distribuidor de gas para los quemadores.

Figura 31. Partes del módulo de adquisición de datos



²⁸ El módulo de adquisición de datos y el panel de control de la marmita se desarrolló con la colaboración de la ingeniera electrónica Cynthia Vega profesional de proyectos de la corporación CDT de GAS.

Tabla 23. Instrumentación del módulo de adquisición

Módulo de adquisición de datos para pruebas de eficiencia ASTM F-1785			
NOMBRE	FABRICANTE	REFERENCIA	CANT
Pantalla LCD	4D Systems	7"	1
Tarjeta de Desarrollo	Beaglebone	Beaglebone Black	1
Tarjeta de adquisición de datos	Sunyuan SZ	SYAD-02A	1
Transmisor de temperatura	-	0 - 50 °C	1
Transmisor de temperatura	-	0 -100 °C	1
RTD	-	PT100	2
Sensor-Transmisor de presión Diferencial	Dwyer	616KD-05	1
Fuente de poder	Mean Well	MDR-20-24	1

Para el modulo se tiene un lazo en el cual está una RTD Pt 100 + transmisor para ambos casos de temperatura, y para la presión diferencial se tiene en conjunto sensor-transmisor (se utiliza el transmisor con el fin de obtener una señal de corriente de 4 a 20 mA), todas las señales van a una tarjeta de adquisición de datos Sunyua SZ, que convierte esa señal de corriente a Modbus TCP la cual envía esa información a la tarjeta Beaglebone Black.

Inicialmente se iba a utilizar un medidor de gas con salida de pulsos directamente conectada a la Beaglebone pero se presentaron inconvenientes en la configuración con la tarjeta de adquisición razón por la cual se decidió realizar la toma de datos con un Medidor para gas G 2,5 tipo diafragma marca Metrex calibrado por la corporación CDT de Gas.

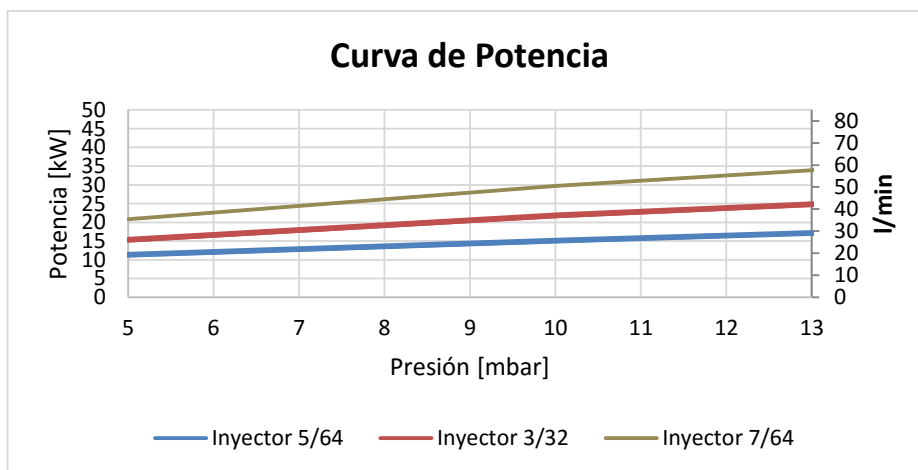
9 PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Antes de realizar las pruebas finales de desempeño se verificó la potencia de los quemadores con tres tipos de inyectores (5/64 ,3/32, 7/64), gracias a la válvula de apertura lenta la cual permite ajustar la presión de operación; de esta forma se determinó que el inyector más adecuado para alcanzar una potencia en el rango de 25 kW a una presión máxima de 5 inWC es el inyector 3/32, los cuales fueron utilizados para las pruebas de eficiencia.

A la válvula seleccionada se le configuró la primera etapa a 3 inWC para permitir un encendido suave de los quemadores y en un lapso de 4 segundos se activa la segunda etapa a una presión máxima de 5 inWC luego de que los 3 quemadores están totalmente encendidos.

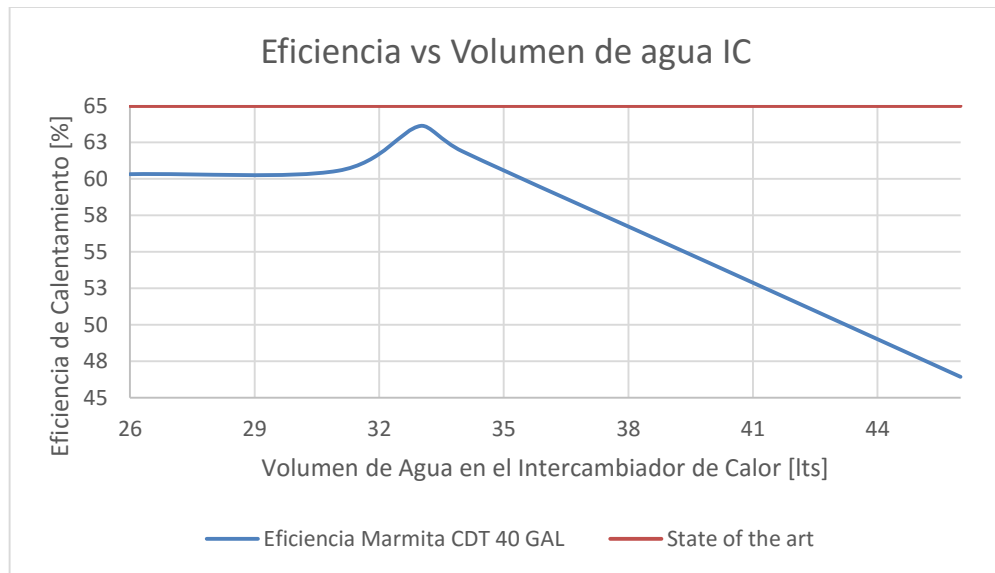
Además días antes de realizar las pruebas, se presurizo la mamita hasta una presión aproximadamente de 10 psi, posteriormente se realizaron venteos sucesivos hasta obtener una presión entre 1 psi a 2 psi, para garantizar el menor volumen de aire contenido en la chaqueta de vapor (de esta manera cuando la marmita está a temperatura ambiente, el interior de la chaqueta se encontrara en vacío a más o menos -10 psi), teniendo en cuenta que el aire acumulado consumirá energía al calentarse (acumula calor sensible no útil) a las condiciones de operación y ocasionará resistencia en la transferencia de calor entre el vapor y el producto. Gracias a este procedimiento se logró llevar a la chaqueta de vapor a una presión de vacío de -11psi lo que permitía que el agua se empezará a evaporar rápidamente en las pruebas de calentamiento.

Figura 32. Curva aproximada de la potencia de los quemadores para diferentes diámetros de inyectores



Luego se determinó el volumen de agua en el intercambiador de calor que permitiera alcanzar la mejor eficiencia de calentamiento.

Figura 33. Efecto del volumen de agua (en el intercambiador de calor) en la eficiencia

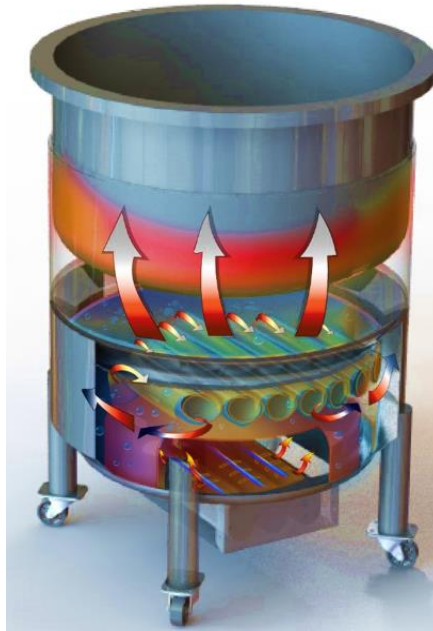


A través de este procedimiento se observó que el volumen óptimo de agua es de aproximadamente 33 litros, el cual es un nivel de agua 1 [cm] por encima de los tubos de calor del intercambiador, lo que garantiza que no se presente sobrecalentamiento en el acero inoxidable, a esta altura se obtuvo la mejor relación entre la masa de agua a calentar y el área de transferencia de calor.

La eficiencia de calentamiento empieza a caer a medida que el nivel de agua aumenta ya que es aquí donde se encuentra la parte cónica de la chaqueta de gases, lo que ocasiona un aumento significativo del volumen de agua a contener con respecto al área de transferencia de calor, esto se puede observar en la gráfica en los rangos de volúmenes de agua superiores a 36 litros. Por otro lado a pesar que con un volumen de agua inferior a 33 litros la eficiencia no cae por debajo del 55%, no se recomienda un volumen de agua en este rango ya que los tubos de calor no quedan sumergidos, causando sobrecalentamiento en el material, lo cual se

puede observar con los altos rangos de temperatura a la salida de la chimenea superiores a 250°C.

Figura 34. Intercambio de calor en la marmita



Fuente: CDT de GAS y Autor.

9.1 EFICIENCIA DE CALENTAMIENTO

9.1.1 Procedimiento general de determinación de Eficiencia de Calentamiento, según ASTM F1785. Las pruebas de desempeño de la Marmita Autogeneradora de Vapor se realizaron siguiendo el procedimiento de la Norma ASTM-F1785 (08), “*Standard Test Method for Performance of Steam Kettles*” para determinar el consumo máximo y la eficiencia de calentamiento.

Estas pruebas fueron efectuadas en el Taller de Lácteos del –“Centro de Desarrollo Productivo de alimentos”- CDPA, en la Sede de Investigaciones UIS –Guatiguará, en Piedecuesta, Santander. Se utilizaron equipos de la Corporación CDT de GAS, adecuadamente seleccionados por su alcance y cualidades metrológicas.

Los instrumentos utilizados incluyeron el monitoreo de gases de combustión, además la medición de Presión, Temperatura y Volumen de gas a través del módulo de adquisición de datos. Estos instrumentos y equipos se encuentran asegurados metrológicamente dentro del Sistema de Gestión de la Calidad NTC/ISO/IEC-17025 “*Requisitos Generales para los Laboratorios de Calibración y Ensayos*”, norma bajo la cual se encuentra acreditado el Laboratorio de C&E de la Corporación CDT de Gas para la medición de dichas magnitudes.

Las pruebas de desempeño permiten determinar la eficiencia de manera directa, es decir la relación entre la energía útil y la energía consumida. Así:

$$\eta = \frac{\text{Energía Útil}}{\text{Energía consumida}} = \frac{m * C_p * (T_f - T_i)}{V * H_V}$$

Dónde:

m = Masa de agua correspondiente al 90% del volumen del recipiente [kg]

T_f = Temperatura final [°C]

T_i = Temperatura inicial [°C]

C_p = Calor específico promedio para el agua [kJ/(kg°C)]

V = Volumen de gas consumido, referenciado a condiciones estándar [m³]

H_V = Poder Calorífico del Gas Natural a condiciones estándar [kJ/m³]

La energía útil se determina como el calor sensible necesario para incrementar la temperatura de una cantidad de agua. Según el procedimiento ASTM F1785, se llena la marmita con agua potable al 90% de su capacidad de rebose, y se calienta desde 30°C a 70°C, mientras se mide el consumo de gas. Para poder hacer la corrección del volumen de gas a condiciones estándar (Condiciones base establecidas en el Reglamento único de Transporte –RUT–; P: 14.65 psia y T: 60°F), se debe medir la temperatura y presión de suministro, y la temperatura y presión atmosférica local. Así:

$$V = V_f * \frac{p_f}{p_{std}} * \frac{T_{std}}{T_f} * F_{pv}$$

Dónde:

$V_f =$ Volumen de gas consumido a condiciones de flujo [m^3]

$p_f =$ Presión absoluta de suministro de gas [Pa]

$p_{std} =$ Presión absoluta estándar [Pa]

$T_{std} =$ Temperatura estándar [K]

$T_f =$ Temperatura de suministro de gas [K]

$F_{pv} =$ Factor de supercompresibilidad del gas (AGA 8)

Tabla 24. Condiciones Atmosféricas y de Referencia

Lugar	CDPA, UIS Guatiguará, Piedecuesta, Santander		
Variable	Valor		Unidad
Presión atmosférica promedio	0,9039	(90390)	Bar (Pa)
Temperatura ambiente promedio	27	(300,15)	°C (k)
Presión de referencia	14.65	(101008,19)	Psia (Pa)
Temperatura de referencia	60	(288,71)	°F (k)

Tabla 25. Gas Suministrado

Origen del Gas	Pozo Gibraltar	
Distribuidor	TRANSORIENTE S.A. ESP	
CROMATOGRAFÍA DEL GAS* ASTM D1945		
Componente	Fórmula	Concentración, % mol
Nitrógeno	N ₂	0.528
Metano	CH ₄	89.178
Dióxido de carbono	CO ₂	1.850
Etano	C ₂ H ₆	5.759
Propano	C ₃ H ₈	1.807
Isobutano	C ₄ H ₁₀	0.404
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0.341
Isopentano	C ₅ H ₁₂	0.063
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0.041
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	0.029
Poder Calorífico Superior estándar, ASTM D 3588		1077.207 BTU/ft ³
Densidad real estándar, ASTM D3588		0.048 Lb/ft ³
Factor de compresibilidad estándar, AGA 8		0.9975

Fuente: Reporte de Análisis INRA-12-CRM-013-1951. Laboratorio de Calidad de Gas. CDT de Gas.

Tabla 26. Energía requerida

Fluido de Trabajo	Agua Potable	
Variable	Valor	Unidad
Masa de agua a rebose	151	Kg
Masa de agua para prueba	136	Kg
Calor específico promedio	4.1826	kJ/kgK
Temperatura inicial	30.0	°C
Temperatura final	70.0	°C
Energía Útil	22753.344	Kj

Tabla 27. Resultados de las pruebas de eficiencia

Pruebas de Eficiencia			
<i>Inyector</i>	3/32	3/32	3/32
<i>Prueba</i>	8	9	10
<i>Agua IC [litros]</i>	33	33	33
<i>pgas [inWC]</i>	4	4	4
<i>Tgas [°C]</i>	35	34	33
<i>Vdiaf [litros]</i>	1055	1041	1046
<i>Vcorr [litros]</i>	894,74	885,02	892,71
<i>t [s]</i>	1607	1582	1585
<i>Qsum [kJ]</i>	35910,79	35520,75	35829,55
<i>Psum [kW]</i>	22,35	22,45	22,61
<i>Prec [kW]</i>	14,16	14,38	14,36
<i>Eficiencia [%]</i>	63,36	64,06	63,50
<i>Temperatura de los gases chimenea [°C]</i>	209,7	194,1	199,6

Dónde:

Inyector = Diámetro de descarga de inyector es [in]

Nivel = Volumen de agua contenida en la chaqueta de vapor [lts]

pgas = Presión manométrica promedio de suministro de gas ["w. c]

Tgas = Temperatura promedio de suministro de gas [°C]

Vdiaf = Volumen de gas registrado por el medidor [lts]

Vcorr = Volumen de gas corregido a condiciones base [lts]

t = Tiempo total de la prueba [s]

Caudal = Caudal de gas corregido a condiciones base [lt/min]

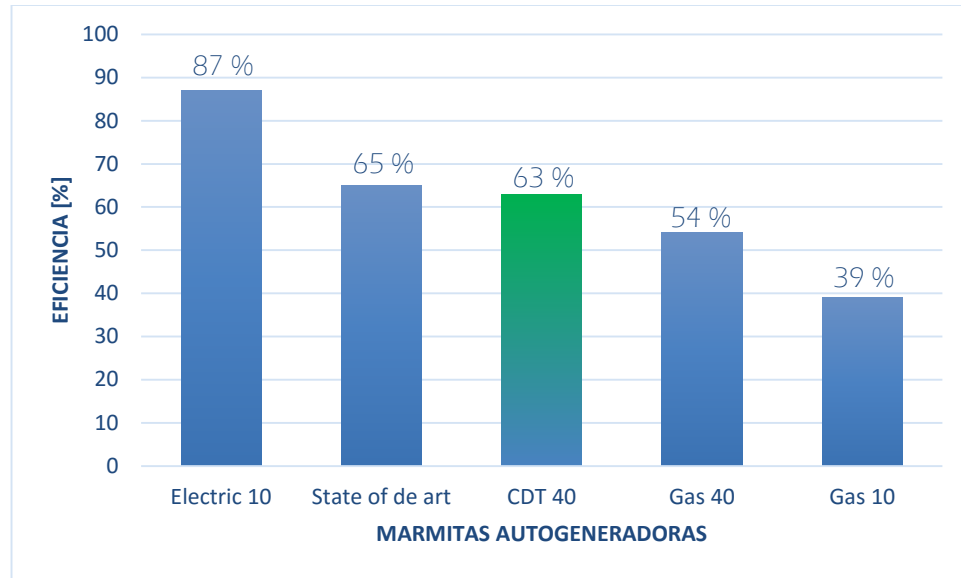
Psum = Potencia total suministrada al fluido de trabajo [kW]

Prec = Potencia útil suministrada al fluido de trabajo [kW]

η = Eficiencia de calentamiento del equipo

El rendimiento térmico fue 63.64%, esto una alta eficiencia de acuerdo con estudios de benchmarking.

Figura 35. Comparación eficiencia de calentamiento según datos publicados por Food Service Technology Center



9.2 CONSUMO DE ENERGÍA A FUEGO LENTO

9.2.1 Procedimiento general de determinación del Consumo de energía a fuego lento, según ASTM-F1785: Adicionalmente, la Norma ASTM-F1785 incluye un procedimiento que permite determinar el Consumo de energía a fuego lento de la marmita autogeneradora. Esto es, determinar la potencia requerida por la marmita para mantener una temperatura específica en el agua de calentamiento durante un tiempo determinado, corroborando a su vez la respuesta del termostato ante el set-point establecido.

En este caso, la prueba se realiza después de la prueba de calentamiento, con la misma cantidad de agua. El control de temperatura es ajustado para mantener el agua a 165°F (74°C) por 3 horas continuas. Se debe permitir que la temperatura del agua se estabilice, cuando alcance dicha temperatura promedio después de varios

ciclos se empieza a monitorear el tiempo, temperatura y consumo de energía. La medición debe comenzar cuando termine un ciclo, esto es, cuando los quemadores se apaguen. Se continúa monitoreando por 3 horas. El consumo de energía a fuego lento se determina como:

$$SR = \frac{E_{kettle}}{t}$$

Dónde:

SR = Consumo de Energía durante 3 horas de calentamiento [kW]

E_{kettle} = Energía consumida por la marmita en el mismo período [kJ]

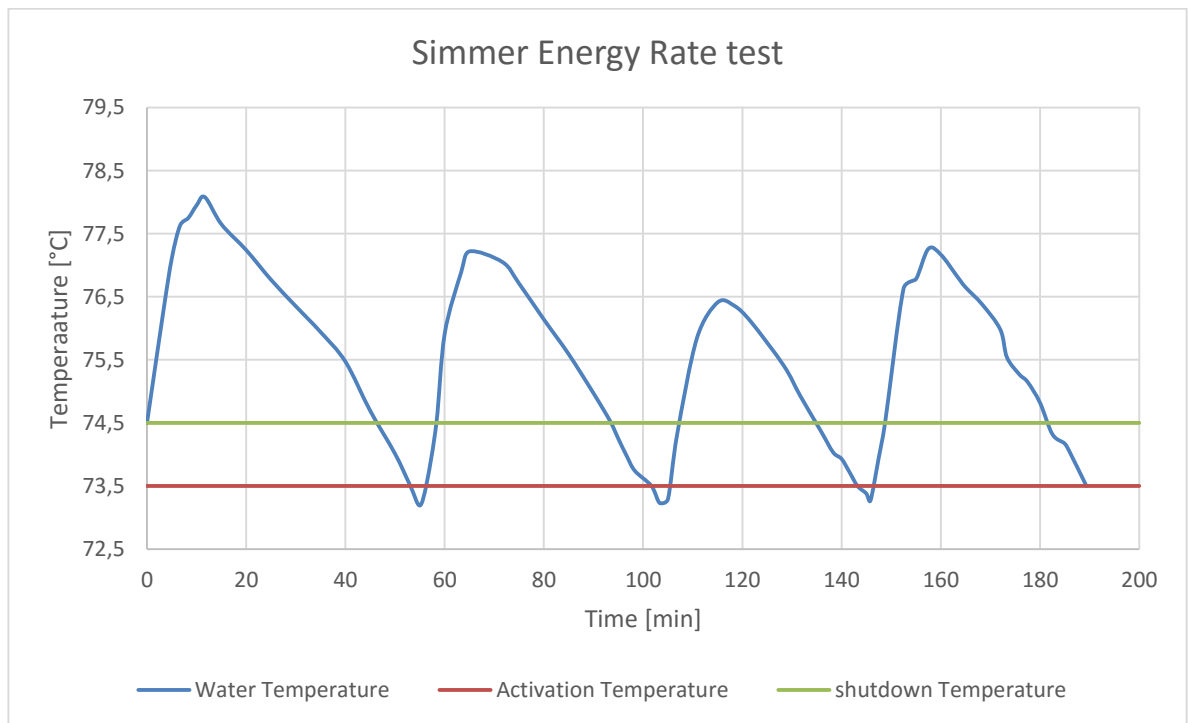
t = Tiempo de Calentamiento [s]

ASTM F1785 establece un procedimiento para determinar la tasa de energía a fuego lento para mantener el producto a cocinar a la temperatura establecida para un período de tiempo. Esta prueba se lleva a cabo después de la prueba de eficacia de la calefacción. El controlador de temperatura de la marmita se ajusta a $74 \pm 0,5$ °C, cuando la marmita alcanza esta temperatura, el controlador cierra la válvula de solenoide principal, y los quemadores de gas se apagan. Cuando la temperatura está por debajo del punto de ajuste, el controlador abre la válvula de solenoide, los quemadores se encienden, y la temperatura aumenta de nuevo hasta que se alcanza el punto de ajuste. La prueba de energía a fuego lento se lleva a cabo durante 3 horas, donde se pueden presentar varios ciclos de calentamiento y de enfriamiento durante este lapso de tiempo. La figura 35 muestra el comportamiento de la temperatura durante la prueba. La temperatura establecida es 74°C y el controlador de temperatura tiene un rango mínima de 1°C, por lo que el límite superior fue 74.5°C y el límite inferior fue 73.5°C.

9.2.2 Resultados de la prueba a fuego lento

La temperatura del agua cambió de 73,19°C a 78,08°C. Aunque los quemadores se apagan cuando la temperatura alcanza 74,5°C, los aumentos de temperatura a 78,08°C son debido a la energía acumulada como la presión de vapor (calor latente). Cuando la temperatura alcanza el pico disminuye a medida que la presión interna disminuye debido a la ebullición del vapor hacia abajo dentro de la chaqueta.

Figura 36. Prueba de consumo de energía a fuego lento



Es importante recordar que la temperatura del vapor (y agua de cocción) está directamente relacionada con y dependen de la presión de saturación (presión de servicio dentro de la camisa). Tiempo de calentamiento (quemadores encendidos) tiene una duración de 5 minutos, y el tiempo de enfriamiento (quemadores apagados) de 43 minutos en promedio, por lo que mantener una temperatura determinada requiere que la marmita se mantenga apagada más del 90% del tiempo total de la prueba, lo que permite una reducción significativa de los costos de combustible.

La tasa de energía Simmer (Cocción a fuego lento) se calcula como la relación entre el volumen neto de gas natural y el tiempo de prueba. En este caso, la tasa de energía aparente es 1,92kW lo cual es un buen valor según el reporte de la Food Service Technology Center que muestra que la tasa de energía simmer para una marmita de 40 galones es en promedio 2,64 kW.

9.3 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Para todas las pruebas de eficiencia, adicionalmente se monitoreo los niveles de emisiones en los gases de combustión, con un Equipo Analizador de Gases de Combustión AMPRO 2000. Este equipo permite monitorear simultáneamente la concentración de oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. A partir de estas mediciones, el Analizador de Gases de Combustión calcula el exceso de aire de combustión, las concentraciones de los gases y la eficiencia térmica (combustión) del equipo.

Tabla 28. Resumen de Características Metrológicas del Analizador de Gases

Dispositivo	Gas Handheld Analyzer AMPRO 2000	
Fabricante	MRU Instruments, Inc.	
Componente de Medición	Rango	Exactitud
O₂ Oxígeno	0-21 Vol-% abs.	± 0.2 Vol-% abs.
CO₂ Dióxido de Carbono	0-20 %	± 0.4 Vol-% abs.
CO Monóxido de Carbono	0-4000 ppm	± 20 ppm o 5% lectura < 4000ppm
NO Monóxido de nitrógeno	0-1000 ppm	± 5 ppm o 5% lectura <1000ppm
NO₂ Dióxido de Nitrógeno	0-200 ppm	± 5 ppm o 5% lectura <200ppm
T-Gas Temperatura de gases	≤1200°F	± 36°F <392°F / 1% lectura >392°F
T-Air Temperatura del Aire	≤212°F	± 34°F
Eficiencia	0-120%	-
Exceso de Aire	0-99.9	-

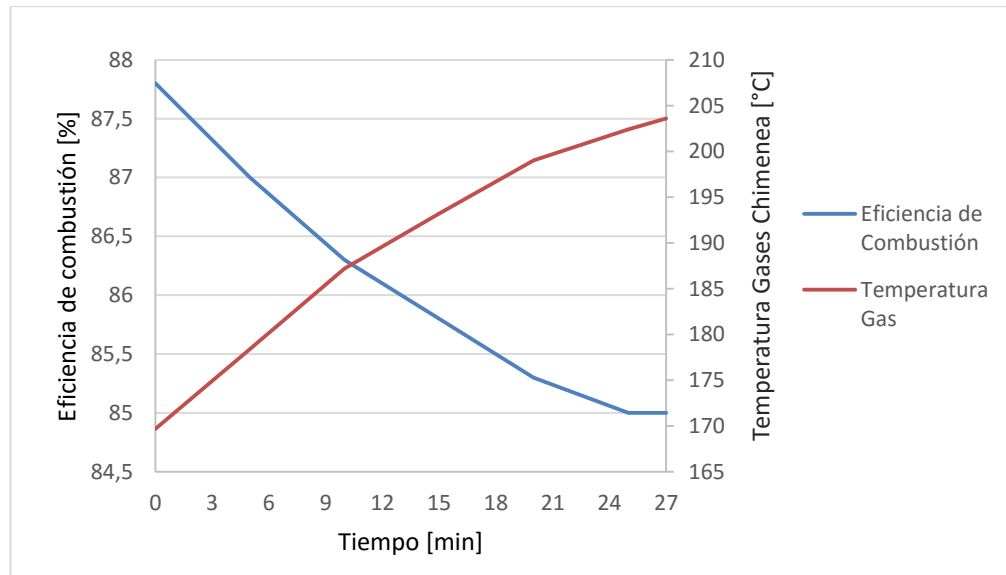
9.3.1 Resultados del Análisis

El rendimiento de la caldera de la marmita se midió en las mismas condiciones de la prueba de eficiencia de calentamiento.

Tabla 29. Valores del analizador de gases en a prueba 9

PRUEBA 9							
tiempo (seg)	0	5	10	15	20	25	27
Exceso de Aire (%)	19	19	19	19	20	20	19
O2 (%)	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,4	3,3
CO2 (%)	8,24	8,2	8,14	8,12	8	8,09	8,07
CO (ppm)	3,1	3	2,8	2,5	2,4	2,4	2,3
NO (ppm)	88	88	92	91	89	90	91
NO2 (ppm)	4	3	3	3	2	2	2
NOx (ppm)	95	93	95	94	92	93	94
CH4 (%)	0	0,1	0,1	0,4	0,4	0,7	0,7
Temperatura gas [°C]	169,7	178,4	187,2	193,2	199	202,4	203,6
Temperatura aire [°C]	26,8	26,9	27	27,1	27,2	27,4	27,4
Losses (%)	12,2	13	13,7	14,2	14,7	15	15
Eficiencia de combustión (%)	87,8	87	86,3	85,8	85,3	85	85

Figura 37. Eficiencia de combustión vs Temperatura de Gas a la salida de la chimenea



Según los cálculos realizados por el analizador, el exceso de aire se estableció entre el 19-20%, además el rendimiento de la caldera se redujo de 87,8% a 85% a medida

que la temperatura de la chimenea de combustión aumentó de 169,7°C a 203,6°C, la figura 35 muestra este comportamiento: la eficiencia de la caldera es inversamente proporcional a la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea ya que la diferencia de temperatura entre los gases de combustión y el agua de vaporización disminuye durante la prueba, por lo que el potencial de transferencia de calor es más bajo al final de la prueba.

9.4 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA

9.4.1 Procedimiento general de determinación de la Incertidumbre en el reporte de resultado de pruebas, según ASTM –F1785: Este procedimiento está basado en el método ASHRAE para determinar el intervalo de confianza para el promedio de varios resultados de una prueba (ASHRAE Guideline 2 -1986 RA90). Se aplica para resultados de pruebas que se hayan obtenido con las tolerancias especificadas en la F1785 y se debe reportar la incertidumbre de al menos tres corridas de cada prueba, como en el caso particular. La incertidumbre de la eficiencia de calentamiento no debe ser mayor que $\pm 10\%$. En caso de superar este porcentaje, se debe correr una prueba adicional y recalcularse hasta que no se sobrepase el umbral.

La incertidumbre es calculada a partir de la desviación estándar de tres o más resultados y un factor específico. El porcentaje de la incertidumbre es la razón de la incertidumbre al promedio, expresada como porcentaje. Se calcula el promedio y la desviación estándar de los resultados, mediante:

$$Xa_n = \frac{1}{n} * (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)$$

$$S_3 = \frac{1}{\sqrt{(n-1)}} * \sqrt{A_n - B_n}$$

Dónde:

$Xa_3 =$ Promedio de tres resultados

$x_1, x_2, x_3, x_n =$ Resultados de cada una de las corridas

$S_3 =$ Desviación estándar de los resultados de tres corridas

$$A_n = (x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 + \dots + (x_n)^2$$

$$B_n = (1/n) * (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)^2$$

La incertidumbre absoluta y el porcentaje de incertidumbre de n resultados se calculan como:

$$U_n = C_n * S_n$$

$$\%U_n = (U_n/Xa_n) * 100$$

Dónde:

$U_n =$ Incertidumbre absoluta en el promedio de n resultados

$C_n =$ Factor de incertidumbre para n resultados

$\%U_n =$ Porcentaje de incertidumbre en el promedio de n resultados

La eficiencia se reporta como el promedio de ésta junto a su incertidumbre absoluta.

Así:

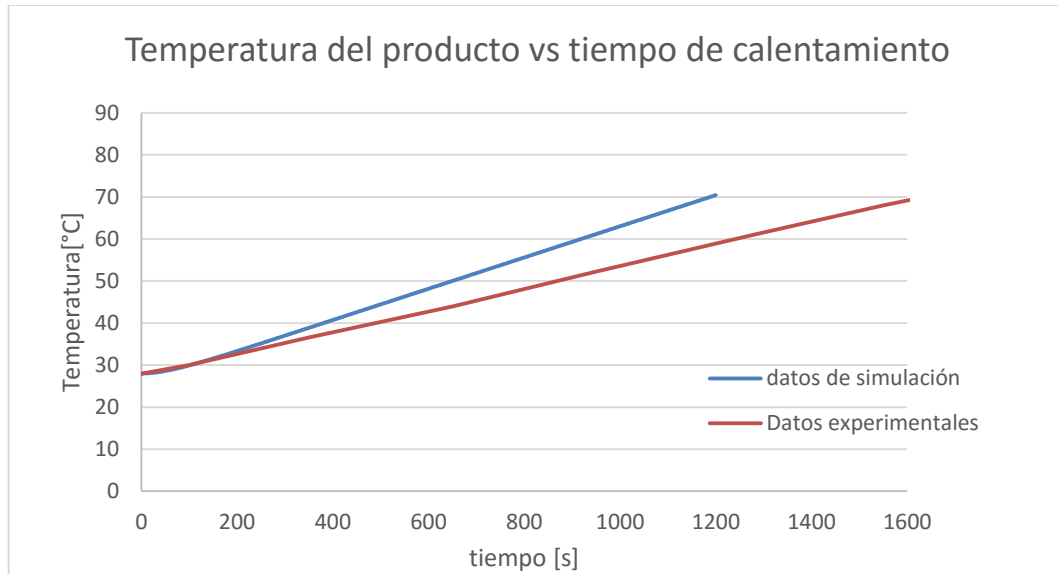
$$Xa_3 \pm U_3$$

El promedio aritmético de 3 resultados de la Tabla 30 es 63,64 y la desviación estándar es 0.3704. Para 3 resultados, el factor de incertidumbre es de 2,48 según la ASTM F1785. Así la incertidumbre es apropiada ya que es 1,44% < 10%. Por último, la eficiencia de calentamiento es igual a 63,64 ± 0,92 %.

9.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Como se puede observar en la figura 4 el modelo de calentamiento alcanzo la temperatura deseada, 9 minutos antes del tiempo real, pero es debido a que para los cálculos del modelo de transferencia la potencia de suministro es de 30 kW, la cual no se alcanzó en la prueba real ya que la válvula de suministro de gas no alcanzo las 5 inWC requeridas para alcanzar dicha potencia.

Figura 38. Comparación de los resultados de simulación con los datos experimentales de la temperatura del producto vs tiempo de calentamiento.



Del modelo se puede concluir, que mostró un comportamiento similar de la temperatura del producto dentro de la marmita autogeneradora de vapor durante su periodo de calentamiento con respecto a los datos experimentales. Numerosos fenómenos se tuvieron en cuenta y se compararon en términos de los flujos de entalpía.

La condensación es el principal medio de transferencia de calor al producto, la transferencia de calor por convección es mucho más bajo. La condensación está limitada por la presencia de aire, razón por la cual la marmita se llevó a condiciones cercanas de -11psig mejorando la transferencia de calor al producto.

10 CONCLUSIONES

Se construyó un prototipo de marmita autogeneradora de vapor a gas de capacidad de 40 galones con manufactura local, teniendo en cuenta los requerimientos de control y seguridad de la norma ASTM F1602-02 y del código ASME de calderas y recipientes a presión, y Normas Técnicas Colombianas aplicables, haciéndolo un producto adecuado para su transferencia en todo el sector agroindustrial.

Se logró un funcionamiento adecuado del sistema de combustión de la marmita, gracias a la incorporación de un módulo de control de ignición de superficie caliente, una válvula de dos etapas de apertura lenta, quemadores de pre-mezcla total tipo OVO, un sistema de distribución del combustible, y un dimensionamiento adecuado de la cámara de combustión; evitando los problemas presentes en el primer prototipo como lo fueron el exceso de aire, fallas en el encendido del sistema y las pequeñas explosiones o “fogonazos”.

Se construyó un conjunto de transferencia de calor óptimo (Intercambiador de calor, cámara de combustión, chaqueta de gases, chaqueta de vapor y recipiente) con la ayuda de un modelo matemático, en donde se consideró gran parte de los fenómenos presentes en el proceso de calentamiento de la marmita, lo que permitió un aumento significativo de la eficiencia energética.

La nueva marmita alcanzó una eficiencia energética de $(63,64 \pm 0,92)$ % (valor muy cercano al state of de art) para una potencia nominal de 23 kW de acuerdo al procedimiento de evaluación ASTM F1785 del 2008, que corresponde a una alta eficiencia de acuerdo al benchmarking realizado por el Food Server Technology Center de Estados Unidos.

BIBLIOGRAFÍA

ASME BPVC. Boiler and pressure vessel code. Sección VIII División 1. Sub partes UG,UW Y UHA. Apendices 9 y 19

ASTM F1603. Estándar Specification for Kettle Steam-Jacketed 1 to 757 litros tilting, table mounted, direct steam, gas and electric heated.

ASTM F1785. Estándar Test method for performance of steam kettles

BURGOS Natalia y ESCALANTE Humberto. Diseño conceptual del proceso productivo de dulces de guayaba utilizando gas natural en el municipio de Moniquira. Proyecto de grado UIS, 2006

CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. 2 ed. México D.F. Mc Graw Hill. 2004. 808 pág.

Food Service Technology Center – FSTC. Fisher Don. Comercial cooking appliance technoogy assessment. FSTC Report #5011.02.26

GOMEZ Juan Carlos. Análisis de necesidades regionales en materia de fluidos y energía departamento de Santander. Corporación CDT del GAS. Proyecto de fortalecimiento 2008 RC-238-2007. Bucaramanga 2008

Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Conductos metálicos para evacuación por tiro natural de los productos de la combustión del gas. NTC 3567

Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Dimensionamiento, construcción, montaje y evaluación de los sistemas para la evacuación de los productos de la combustión generados por los artefactos que funcionan con gas. NTC 3833. Bogotá D.C.: El instituto, 2002. 60 p.

Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Equipos de cocción para uso comercial que funcionan con gas. NTC 4082. Bogotá D.C.: El instituto, 1997. [Recurso Electrónico- Base de Datos Biblioteca UIS].

Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Gasodomésticos para la cocción de alimentos. Parte 1. Requisitos de seguridad. NTC 2832-1

Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Requisitos generales de seguridad para artefactos a gas de uso doméstico o comercial y su instalación. NTC 3765. Bogotá D.C.: El instituto, 2004. [Recurso Electrónico- Base de Datos Biblioteca UIS]

KERN, Donald Q. Procesos de Transferencia de calor. México D.F. CECOSA. 1999. 980 pág.

MANRIQUE Víctor. Diseño y Construcción de una Marmita Autogeneradora de Vapor, como alternativa para la Reconversión Tecnológica de la Industria del Bocado Veleño en Santander, Proyecto de Grado, UIS- Ingeniería Mecánica, 2011.

MANRIQUE Víctor y GARCÍA Luis. Marmitas autogeneradoras de vapor, a gas natural: hacia una producción descentralizada, más limpia y eficiente en la industria del bocadillo veleño en Santander. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT de Gas. 2011.

MARADEY, Juan F. Termodinámica Aplicada. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2002.

República de Colombia. Ministerio de comercio, industria y Turismo. Resolución No 1023 del 25 de mayo de 2004. Reglamento Técnico para gasodomésticos que funcionan con combustible gaseosos, que se fabriquen o importen para ser utilizados en Colombia

ANEXOS

ANEXO A. HOJA DE REPORTE DE RESULTADOS

Reporte de Resultados - ASTM F-1785		
Fabricante:	Corporación CDT de GAS	
Modelo:	ASTM F1602- 1D22 B	
Fecha:	24 de Noviembre 2015	
1. Clasificación		
Tipo:	Fija	
Capacidad:	40 Gal. (151,4 lts)	
Grado:	2 (30psi)	
Estilo:	2 (montaje en piso)	
Clase:	B (autogeneradora a gas)	
2. Instrumentos y Procedimiento		
INSTRUMENTO	INTERVALO DE MEDICIÓN	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Sensor-transmisor de presión diferencial Dwyer 616KD-05:	0 - 15 in WC	CERT-15-EMP-938-2355
Sensor -transmisor de presión Dwyer 673-13:	-14,7 a 30 psig	INFC-15-EMP-165-2355
RTD Pt 100	0 a 50°C	CERT-15-EMT-936-2355
RTD Pt 100	0 a 100°C	CERT-15-EMT-937-2355

RTD Pt 100	0 a 200°C	INFC-15-EMT-166-2355
Medidor Metrex para Gas G2,5 Tipo Diafragma	4 m3/h	CERT-15-VOQ-1024-2494

3. Capacidad

Capacidad para pruebas [lts]: 136

4. Consumo Máximo de Energía

Poder calorífico del Gas [BTU/ft3]: 1077,207

Consumo Máximo de Energía [L/min]: 33,57

5. Consumo y Eficiencia de Calentamiento

Poder calorífico del Gas [BTU/ft3]: 1077,207

Heating Time 30-70°C [min]: 27

Capacidad de Producción [Kg/h]: 151

Eficiencia [%]: 63, 64

6. Consumo a fuego lento

Poder calorífico del Gas [BTU/ft3]: 1077,207

Consumo a fuego lento[kW]: 1,92

**ANEXO B. COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL LA MARMITA
AUTOGENERADORA**

COSTOS DE LA MARMITA		
	US	COP (IVA incluido)
sensor RTD		174000
Cuerpo principal		6237502,12
sensor presión	264	818400
cooling element	36,75	113925
Cabeza toriesférica- Cámara de combustión	57	176700
Cabeza toriesférica- Recipiente	130	403000
Costo de entrega - cabezas toriesférica	406	1258600
válvula de seguridad	78,06	241986
ducto flexible	17,45	54095
Superficie caliente	25,32	78492
sensor de llama	32,9	101990
válvula slow opening, 2 stage	105,18	326058
Módulo HSI	95,4	295740
Panel , chaqueta externa y caja quemadores		3503200
Rolloflex		24595,48
Inyectores	12,5	38750
quemadores x 3	163,5	506850
Otros accesorios		600000
Ingeniero (ensamblaje y pruebas) – 1 mes		2122120
COSTOS DE PRODUCCIÓN		16'976.004

PRECIO DE MARMITAS DE GAMMA SIMILAR (CLASIFICACIÓN ASTM 1602) COMPARACIÓN		
Fabricante	marmita	Precio-COP
BIGGI CHILE		\$ 20'165.000

<p>GROEN</p>		<p>\$ 47'668.700</p>
<p>VULCAN</p>		<p>\$ 51'810.000</p>
<p>CLEVELAND</p>		<p>\$ 50'075.850</p>
<p>MARKET FORGE</p>		<p>\$ 50'161.100</p>

ANEXO C. CERTIFICACIÓN DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS



CENTRO DE METROLOGÍA DE FLUIDOS
CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD
ORGANISMO DE INSPECCIÓN

EG- 115-16

Bucaramanga, 28 de Enero de 2016

Señores
Comité Trabajos de Grado de Pregrado
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad Industrial de Santander
Ciudad

Por medio de la presente se certifica que el estudiante **LEONARDO ENRIQUE RIVERA HERNÁNDEZ**, identificado con cédula de ciudadanía No. 1.096.222.276 de Barrancabermeja, cumplió satisfactoriamente los objetivos planteados en el proyecto de grado "Reingeniería aplicada a una marmita de tipo autogeneradora de vapor, construida por la Corporación CDT de GAS para el sector agroindustrial", el cual se encuentra en el marco del proyecto: "Marmita Autogeneradora de Vapor, con Calentamiento por Gas Natural de Alta Eficiencia. Código 549464239677.", auspiciado por Colciencias.

Cualquier inquietud será atendida en los teléfonos 6543800 – 6542266 o al correo electrónico administrador@cdtdegas.com.

Cordialmente,


VICTOR JOSÉ MANRIQUE MORENO
Profesional de Proyectos
Corporación CDT de GAS

ANEXO D. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS UTILIZANDO EL SISTEMA EMBEBIDO BEAGLEBONE BLACK

Figura 1. Módulo de adquisición de datos



11 Rangos de OPERACIÓN

El computador de flujo se diseñó para la medición de temperatura y presión en los siguientes rangos

Variable	Rango
Presión	0 to 15 in w.c
Temperatura	0-100/0-50 °C

12 COMPONENTES

Figura 2. Esquema general

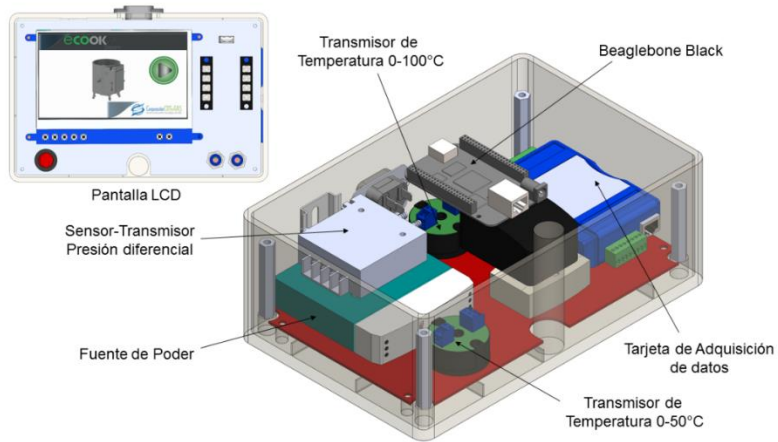
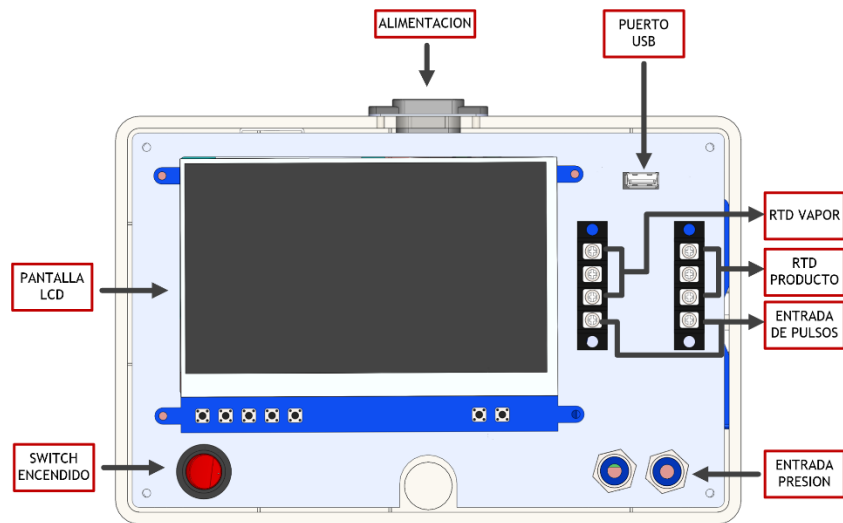


Figura 3. Panel Frontal



13 OPERACIÓN DE LA INTERFAZ

Al oprimir el switch de encendido ubicado en el panel frontal, se enciende el equipo al igual que la pantalla LCD.

Para ingresar a la HMI se debe ingresar el usuario: root y oprimir la tecla enter. Una vez se halla ingresado se ejecuta el archivo marmita, que corresponde a la HMI diseñada.

Para los cálculos realizados se utilizaron las siguientes constantes:

CONSTANTE	VALOR
Temperatura estándar del gas, en °K	288.7056
Presión estándar del gas, en Pa	101008.1943
Presión atmosférica en Piedecuesta, en Pa	90400
Factor de compresibilidad del gas, adimensional	0.9999931
Poder calorífico superior del gas gibraltar a condiciones estándar, en kJ/m³	40136.2359
Masa de agua a calentar, en kg	136.0
Calor específico del agua, en kJ/kgK	4.1826
Temperatura inicial del agua, en Oc	30.0
Temperatura final del agua, en oC	70.0

La interfaz esta compuesta por 4 pantallas: inicio, general, eficiencia y tendencias.

- **PANTALLA DE INICIO**

Al ingresar a la HMI aparece la pantalla de inicio, en la cual se observa el logo y la imagen de la marmita. Al oprimir el botón play se accede a la pantalla general.

Figura 4. Pantalla Principal



- **PANTALLA GENERAL**

Para acceder a esta ventana haga clic en el botón “General” ubicado en la parte superior de la interfaz.

En la pantalla general se puede visualizar las siguientes variables cuando se oprime el botón inicio:

VARIABLE	DESCRIPCION
T gas	Temperatura del gas en la línea de suministro, en °C
T agua	Temperatura del agua, en °C

P gas	Presión manométrica de suministro del gas, en mbar
V gas	Volumen de gas a condiciones de flujo, en lts
Tiempo de lectura	Tiempo de lectura, en mm:ss
Q gas	Caudal de gas a condiciones de flujo, en lts/min

Figura 5. Pantalla General



Nota: El valor de cada variable se actualiza cada segundo, hasta que se oprima el botón fin.

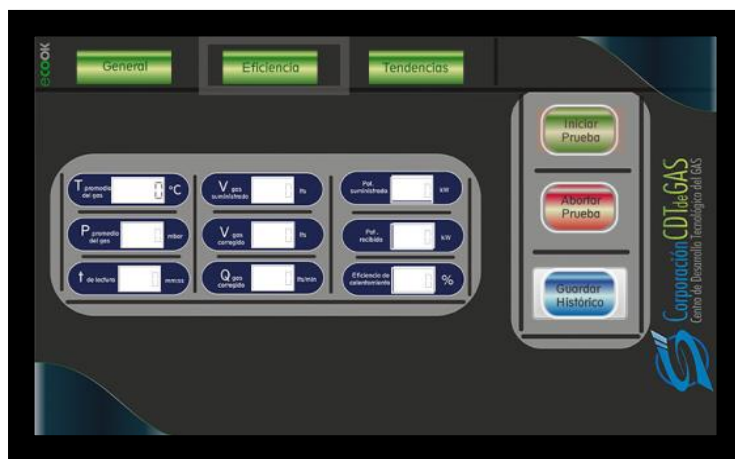
- **PANTALLA EFICIENCIA**

Esta pestaña se emplea para realizar la prueba de eficiencia según ASTM F1785. La contabilización de tiempo y volumen de gas inicia automáticamente cuando el sensor de temperatura del agua alcanza la temperatura inicial del agua asignada y finaliza automáticamente cuando alcanza el valor asignado como temperatura final.

del agua. La pantalla genera un aviso de inicio y fin de prueba, así mismo las lecturas solo se indican una vez haya terminado la prueba.

Para acceder a esta ventana haga clic en el botón “Eficiencia” ubicado en la parte superior de la interfaz.

Figura 6. Pantalla Eficiencia



En la pantalla de eficiencia se puede visualizar las siguientes variables:

VARIABLE	DESCRIPCION
T promedio del gas	Temperatura promedio del gas durante el tiempo de prueba, en °C
P promedio del gas	Presión promedio del gas durante el tiempo de prueba, en mbar
V gas suministrado	Volumen total de gas suministrado durante el tiempo de prueba a condiciones de flujo, en lts

V gas corregido	Volumen total de gas suministrado durante el tiempo de prueba a condiciones estándar, en lts
t de lectura	Tiempo total de prueba, en mm:ss
Q gas corregido	Volumen total de gas suministrado durante el tiempo de prueba a condiciones estándar, en lts/min
Pot suministrada	//Potencia suministrada durante el tiempo de prueba, en Kw
Pot recibida	//Potencia recibida durante el tiempo de prueba, en Kw
Eficiencia de calentamiento	//Eficiencia de calentamiento, en %

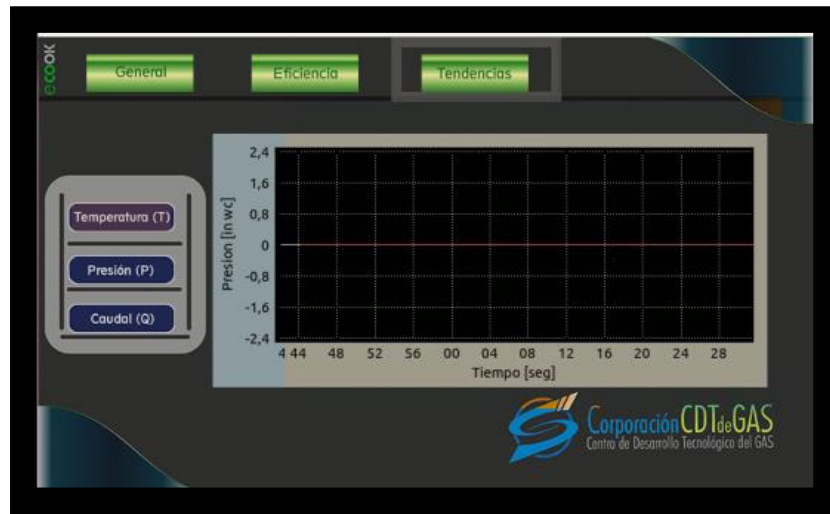
En caso de una eventual falla en la que se requiere finalizar la prueba, haga clic en el botón “Abortar Prueba”. Una vez se ha presionado el botón “Abortar Prueba” no existe posibilidad de retroceder la acción.

- **PANTALLA DE TENDENCIAS**

Esta pantalla presenta gráficos de tendencias para las magnitudes que se están midiendo durante el proceso, como es el caso de temperatura, presión y caudal.

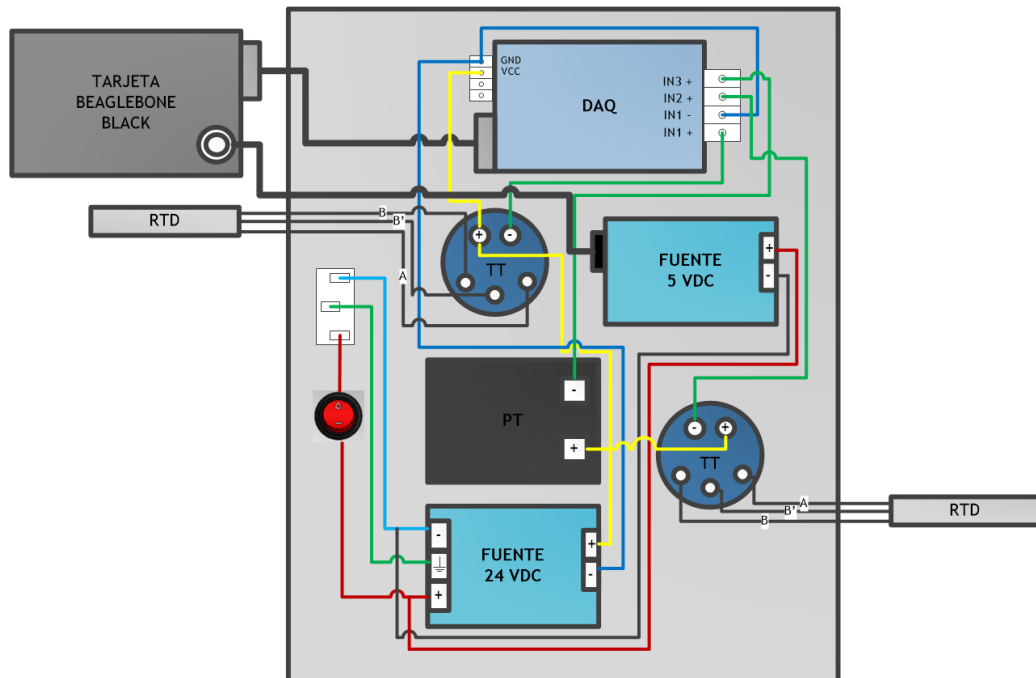
Para acceder a esta ventana de tendencias haga clic en el botón “Tendencias” ubicado en la parte superior de la interfaz.

Figura 7. Pantalla Tendencias



14 conexiones

Figura 8. Conexiones



ANEXO E. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE ECOOK STEAM



1 Rangos de OPERACION

El sistema SCADA esta diseñado para la medición de temperatura y presión en los siguientes rangos

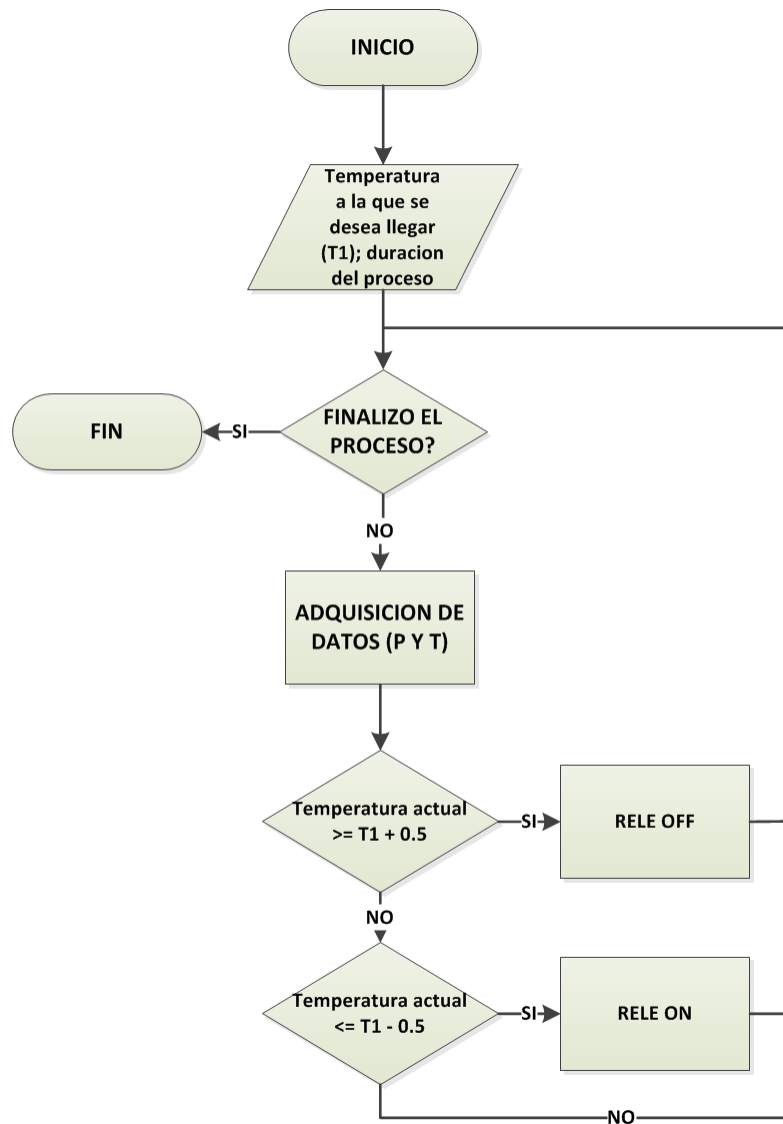
Variable	Rango
Presión	-14.7 a 30 psig
Temperatura	0 - 200°C

2 OPERACIÓN DE LA INTERFAZ

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

Antes de comenzar con el proceso de operación del software se presenta un diagrama de flujo resumido, donde se encuentran los pasos del proceso, como se llevan a cabo por la HMI.

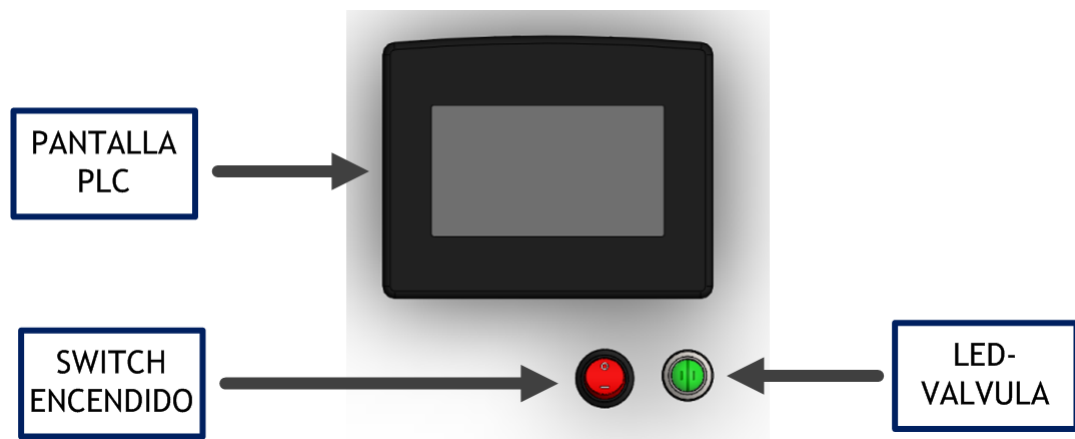
Figura 39. Diagrama de Flujo



3 PANTALLA INICIAL DE LA HMI

Al oprimir el botón rojo ubicado en el panel frontal de la marmita se enciende el equipo Ecook Steam, al igual que la pantalla del PLC, después de unos segundos aparece la HMI diseñada.

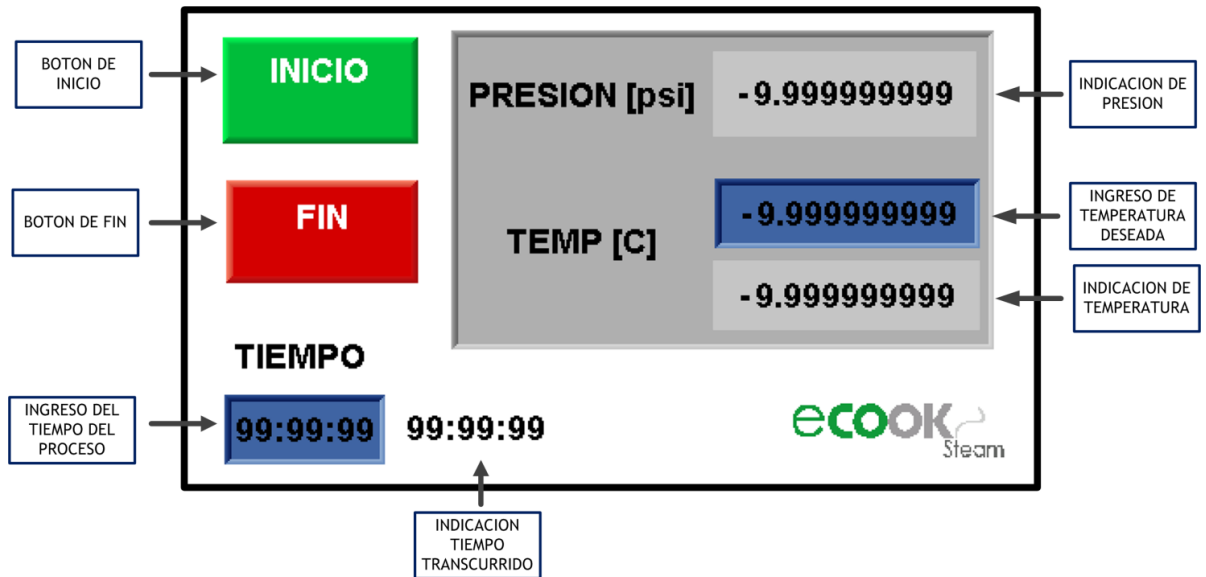
Figura 40. Panel Frontal



Antes de oprimir el botón inicio se debe ingresar el tiempo de duración del proceso y la temperatura a la cual se desea llegar. Una vez se ingrese estos parámetros se oprime el botón "INICIO", inmediatamente se observa en la pantalla las medición de temperatura y presión tomadas cada segundo, hasta que haya finalizado el tiempo de duración asignado a el proceso o hasta que el usuario presione el botón "FIN".

A continuación se describe cada uno de los componentes de la pantalla principal.

Figura 41. Descripción componentes



Nota: Si alguno de los instrumentos no está conectado o lo está de forma incorrecta, la indicación será cero (0).

4 Conexiones

Figura 42. Esquema general

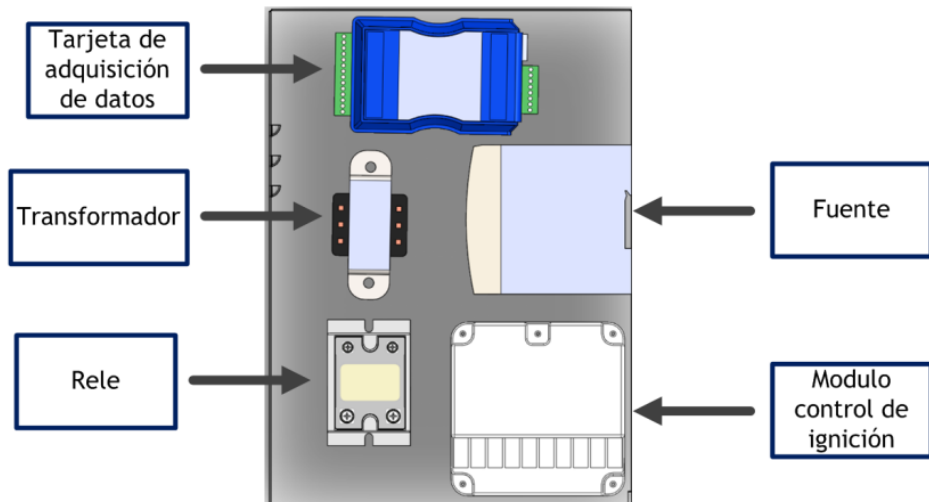
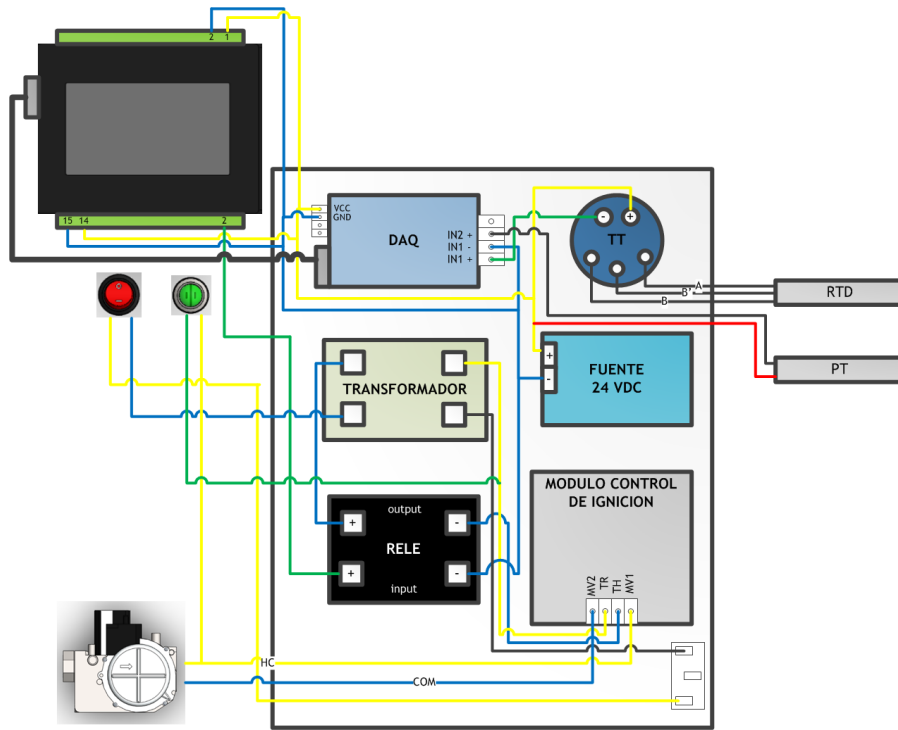


Figura 43. Conexiones



ANEXO F. RESULTADOS DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

El modelo de transferencia de calor se realizó en Simulink de Matlab en donde se puede observar el tiempo de calentamiento del modelo escalado del primer prototipo y del modelo final de la marmita, esto teniendo como base las áreas de transferencia del intercambiador de calor y el agua contenida en este. Los buenos tiempos de transferencia de calor se debe en gran parte a la transferencia de calor por condensación, lo que verifica las ventajas de realizar el calentamiento con vapor en vez de agua caliente.

Figura 1. Modelo de transferencia en Simulink de Matlab

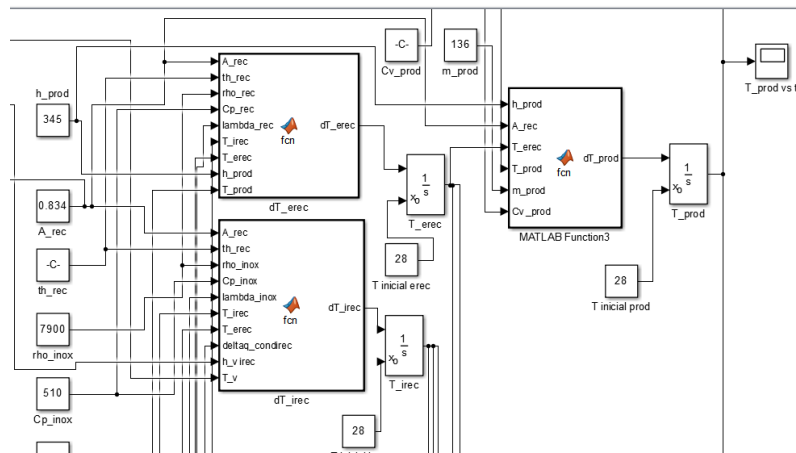
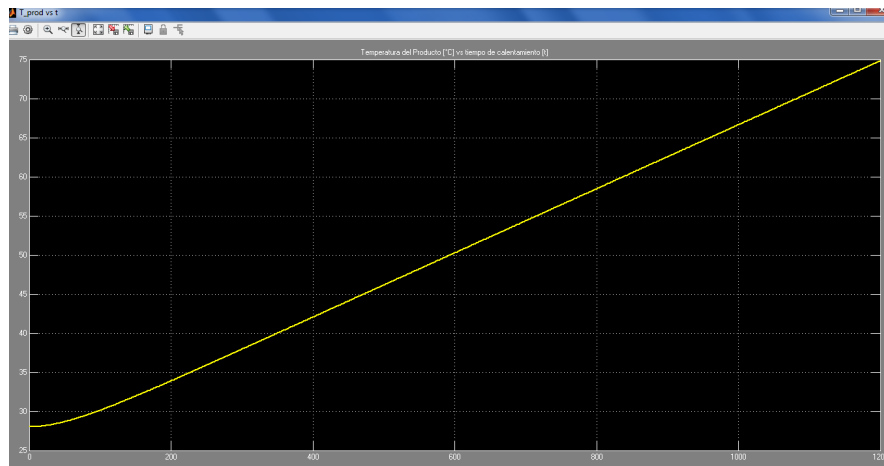
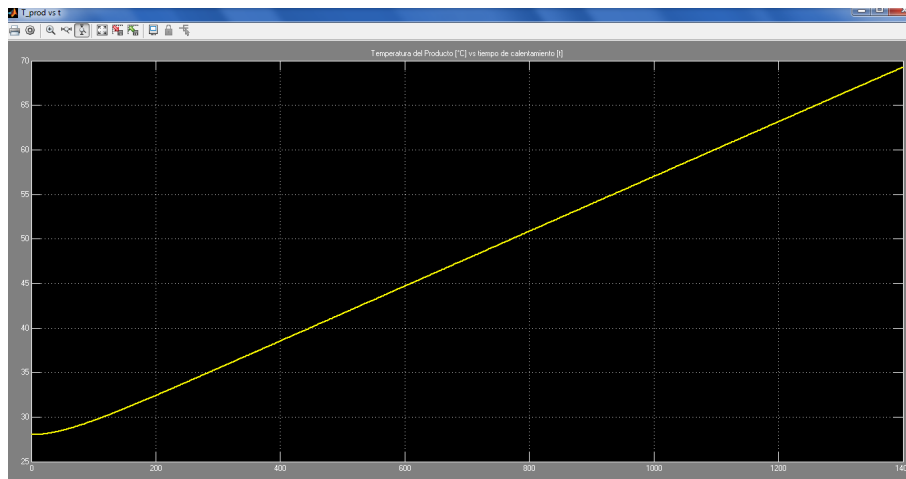


Figura 2. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo



Los resultados obtenidos por el modelo matemático muestran que el tiempo de calentamiento del producto de 30°C a 70°C es de 1050 segundos lo que representa una potencia útil del 21 kW es decir una eficiencia de calentamiento en el rango del 70% para una potencia de suministro de 30 kW.

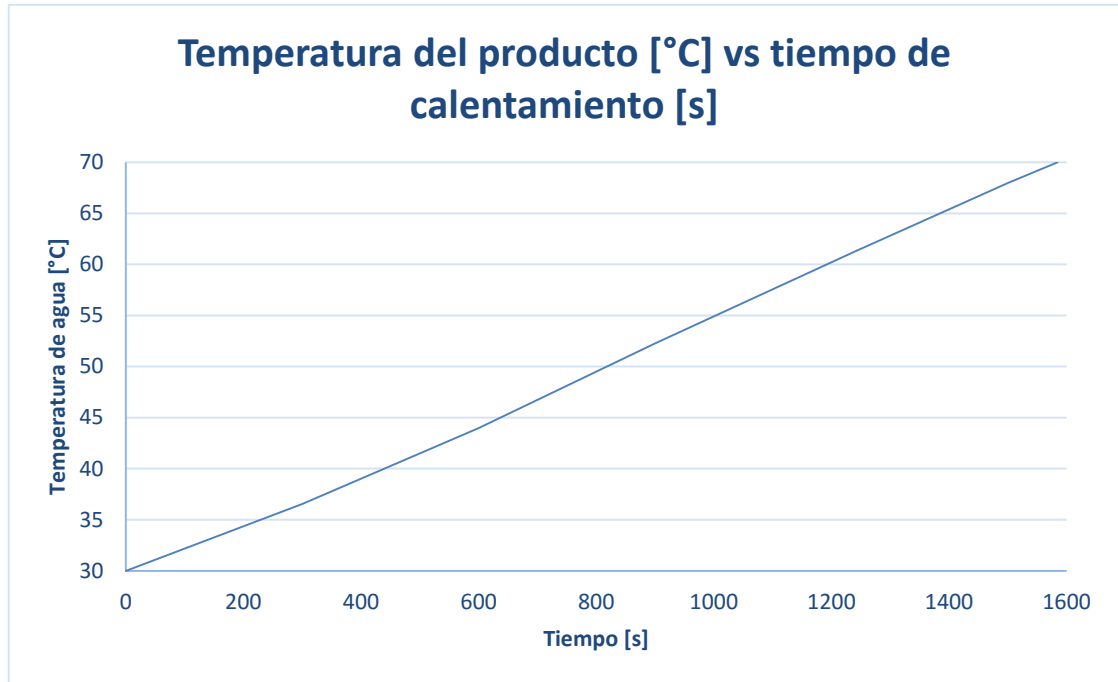
Figura 3. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento para el modelo escalado del primer prototipo.



Por otro lado para el caso del modelo escalado del primer modelo se obtuvo una eficiencia de calentamiento de 58%, a pesar que la configuración geométrica del primer prototipo se conserva para este cálculo se puede observar un aumento de la eficiencia gracias al nivel adecuado de agua en el intercambiador de calor y principalmente al aumento del área de transferencia entre el vapor y el producto, comportamiento que se puede observar con el aumento de la eficiencia energética para los modelos de marmita de 40 galones con respecto a los de 20 galones.

Como se puede observar en la figura 4 el modelo de calentamiento alcanzó la temperatura deseada, 9 minutos antes del tiempo real, pero es debido a que para los cálculos del modelo de transferencia la potencia de suministro es de 30 kW, la cual no se alcanzó en la prueba real ya que la válvula de suministro de gas no alcanzó las 5 inWC requeridas para alcanzar dicha potencia.

Figura 4. Temperatura del producto vs tiempo de calentamiento con datos experimentales.



Del modelo se puede concluir, que fue capaz de predecir correctamente la evolución de la presión y de diferentes temperaturas (producto y paredes) dentro de la marmita autogeneradora de vapor durante su periodo de calentamiento. Numerosos fenómenos se tuvieron en cuenta y se compararon en términos de los flujos de entalpía.

La condensación es el principal medio de transferencia de calor al producto, la transferencia de calor por convección es mucho más bajo. La condensación está limitada por la presencia de aire, razón por la cual la marmita se llevó a condiciones cercanas de vacío mejorando la transferencia de calor al producto.

Nomenclatura del modelo de transferencia

<p> <i>T</i> = Temperatura [°C], <i>t</i> = Tiempo [s] <i>th</i> = Espesor [m] <i>V</i> = Volumen [m³] <i>H</i> = Entalpia [J] \hat{H} = Entalpia especifica $\left[\frac{J}{Kg} \right]$ <i>h</i> = coeficiente de transferencia de calor [W/m²K] <i>k</i> = coeficiente de transferencia de masa [m/s] <i>l</i> = longitud [m] <i>M</i> = masa molar [kg/mol] <i>m</i> = masa [kg] \dot{m} = flujo másico [kg/s] $\dot{m}_{cond \rightarrow A}$ = Flujo másico de condensación en la Pared A [kg/s] <i>P</i> = Presión [Pa] $q_{A \rightarrow B}$ = flujo de calor de A a B [W] <i>r</i> = radio [m] <i>R</i> = constante de gas [8,31 J/K*mol] <i>A</i> = Área [m²] <i>X</i> = fracción másica [kg/mol] $\Delta \hat{H}_v$ = calor latente vaporización a la <i>T</i>_{sat} $\left[\frac{J}{kg} \right]$ $\Delta \hat{H}_o$ = calor latente de vaporización a la <i>T</i>_{ref} $\left[\frac{J}{kg} \right]$ $\Delta q_{cond \rightarrow A}$ = flujo calor por condensación hacia A [W] λ = conductividad termica $\left[\frac{W}{mK} \right]$ ρ = densidad $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ <i>C_p</i> = calor específico [J/kg*K] </p>	<p> SUBÍNDICE <i>a</i> = Aire <i>l</i> = Agua líquida <i>g</i> = Gas <i>gcomb</i> = gases de combustión <i>v</i> = Vapor <i>sat</i> = Vapor saturado <i>amb</i> = Ambiente exterior <i>atm</i> = Atmosférica <i>chaq</i> = Chaqueta de vapor <i>rec</i> = Recipiente de producto <i>IC</i> = Intercambiador de calor <i>aisl</i> = Aislamiento térmico <i>i</i> = Interior <i>e</i> = Exterior <i>out</i> = Salida <i>in</i> = Entrada <i>boil</i> = Ebullición <i>cond</i> = Condensación <i>evap</i> = Evaporación </p>
--	---

ANEXO G. NOMENCLATURA UTILIZADA EN EL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Los símbolos utilizados en la figura 22 son los siguientes:

ts = espesor nominal de la pared recipiente interno, in. (mm)

trj = requerido espesor mínimo de pared de revestimiento exterior, in. (mm)

trc = espesor mínimo requerido de elemento de cierre según lo determinado en el presente documento, in. (mm)

tc = espesor nominal de miembro de cierre, in. (mm)

tj = espesor nominal de pared cubierta exterior, in. (mm)

tn = espesor nominal de pared de la tobera, in. (mm)

r = radio de la esquina de los cierres de toro, in. (mm)

R = radio exterior de la vasija interior, in. (mm)

Rj = radio interior de la chaqueta, in. (mm)

P = presión de diseño interno (UG-21) en la cámara de la chaqueta, psi (kPa)

S = valor máximo esfuerzo admisible, psi (kPa) (UG-23)

j = espacio chaqueta, in. (mm) radio de chaqueta sin radio exterior de la vasija interior.

L = longitud del diseño de una sección de la chaqueta como se muestra en la Figura 24