

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HORNO
CON PLACA RADIANTE INFRARROJA QUE AUMENTE LA EFICIENCIA EN EL
PROCESO DE ASADO DE AREPAS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN**

FERNANDO ULPIANO PANTOJA AGREDA
Cédula 71.639.278



**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN ENERGÉTICA INDUSTRIAL
MEDELLÍN**

2013

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HORNO
CON PLACA RADIANTE INFRARROJA QUE AUMENTE LA EFICIENCIA EN EL
PROCESO DE ASADO DE AREPAS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN**

FERNANDO ULPIANO PANTOJA AGREDA
Cédula 71.639.278

Trabajo de investigación para optar al título de
Magister en Gestión Energética Industrial

Director
Msc. Bernardo Argemiro Herrera Múnera
Profesor de la Maestría en Gestión Energética Industrial
Grupo de Materiales Avanzados y Energía



INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
FACULTAD DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN GESTIÓN ENERGÉTICA INDUSTRIAL
MEDELLÍN

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, julio 06 de 2013

AGRADECIMIENTO

A mi familia por el apoyo que en todo el tiempo he recibido de ellos y que son otro encargo de Dios.

Al profesor **Bernardo Argemiro Herrera Múnera**, reconociendo que sus aportes metodológicos y técnicos le que fueron de gran valía para la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2.2 SÍNTESIS DEL PROBLEMA	19
2.3 HIPÓTESIS	24
2.4 OBJETIVOS	24
General.....	24
Específicos.....	24
3. MARCO TEÓRICO	25
3.1 ESTADO DEL ARTE	25
3.1.1 Reseña histórica	25
3.1.2 Arepas	27
3.1.3 El mercado de las arepas.....	28
3.1.4 Hornos en la industria alimenticia	30
3.1.5 Horno de rayos infrarrojos.....	31
3.2 LAS INDUSTRIAS SIMILARES	31
3.2.1 La industria del pan.....	31
3.2.1 La industria de tortillas Mexicanas.....	32
3.2.2 Producción de Pitas (pan árabe) con placas IR.....	33
3.3 QUEMADORES RADIANTES	34
3.3.1 Eficiencias de los quemadores radiantes	36
3.4 MÉTODO PARA LA PRUEBA DE LA EFICIENCIA DE PLACAS	38
3.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	39
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	41
4.1 EQUIPOS PARA REALIZAR MEDICIONES Y PRUEBAS	41
4.2 ELABORACIÓN DE LAS AREPAS.....	43
4.3 PRUEBAS DE ASADO DE AREPAS EN EQUIPOS TRADICIONALES.....	49

4.4 SIMULACIÓN CFD	52
4.5 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES	55
4.5.1 Carbón de leña.	55
4.5.2 Resistencia eléctrica.	56
4.5.3 Quemadores flautas de gas.	58
4.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS MALLAS	59
4.7 PROCESO DE DISEÑO DEL HORNO	62
4.7.1 Criterios del Diseño experimental.	62
4.7.2 Criterios de diseño del prototipo	63
4.8 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA SIMULACIÓN CFD	66
4.9 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	70
4.10 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	73
5. RESULTADO Y ANÁLISIS.....	76
5.1 RESULTADO DE LAS MEDICIONES EN EL PROTOTIPO	76
5.2 REQUISITOS PARA SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO EN ANSYS FLUENT	77
5.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	79
5.4 REGISTROS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DEL PROTOTIPO	82
5.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EQUIPOS EVALUADOS.....	83
5.6 DATOS SOBRE EL ANALIZADOR DE GASES	84
5.7 RESULTADO ENCUESTA SOBRE ACEPTACIÓN DEL PRODUCTO	85
6 CONCLUSIONES	90
7 RECOMENDACIONES.....	91
7.1 AGENDA DE INVESTIGACIÓN.....	91
BIBLIOGRAFÍA	93
CIBERGRAFÍA	95
ANEXOS	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN MEDELLÍN Y SU ÁREA METROPOLITANA, PARA LA ELABORACIÓN DE AREPAS, UTILIZANDO LEÑA Y CARBÓN DE LEÑA COMO COMBUSTIBLE.....	20
FIGURA 2. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN MEDELLÍN Y EL ÁREA METROPOLITANA, PARA LA ELABORACIÓN DE AREPAS, UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE GAS NATURAL.....	21
INFRAESTRUCTURA FÍSICA.....	21
ESTANTE DE ENFRIAMIENTO	21
FIGURA 3. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN MEDELLÍN Y EL ÁREA METROPOLITANA PARA LA ELABORACIÓN DE AREPAS UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE GLP.....	23
FIGURA 4. RECOPIACIÓN GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.....	26
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DEL MERCADO DE LAS AREPAS SEGÚN NIVEL DE INGRESOS.	29
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DEL MERCADO DE AREPAS EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DE COLOMBIA.	30
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN DE UNA MÁQUINA TORTILLADORAS	33
FIGURA 8. EQUIPO CON QUEMADORES INFRARROJOS PARA FABRICAR PAN ÁRABE	34
FIGURA 9. FUNCIONAMIENTO DE UN QUEMADOR INFRARROJO A GAS CON LLAMA POR ENCIMA DE LA SUPERFICIE RADIANTE.	34
FIGURA 10. EVIDENCIAS DE LOS REGISTROS Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	41
TERMÓMETRO. TERMOCUPLA. PIRÓMETRO	41
ANALIZADOR DE GASES	41
FIGURA 11. DIÁMETRO DE LA AREPA REFERENTE AL TIEMPO DE ASADO EN EQUIPO A GAS NATURAL.....	44
FIGURA 12. DIÁMETRO DE LA AREPA REFERENTE AL TIEMPO DE ASADO EN EQUIPO A ELÉCTRICO.....	45
FIGURA 13. TEXTURA DURANTE LA PRUEBA DE COCCIÓN Y EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS	46

FIGURA 14. PUNTOS DE TOMA DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE LAS DIFERENTES FUENTES DE CALOR.	48
FIGURA 15. MALLADO CORRESPONDIENTE A LAS GEOMETRÍAS SELECCIONADAS, DE ACUERDO A LA FUENTE DE ENERGÍA, PARA LA EVALUACIÓN COMPUTACIONAL.....	53
FIGURA 16. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN Y TEMPERATURA EN LA SIMULACIÓN, CON UN EQUIPO QUE UTILIZA COMO FUENTE DE CALOR UN LECHO DE CARBÓN DE LEÑA.	56
FIGURA 17. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN Y TEMPERATURA EN LA SIMULACIÓN, CON UN EQUIPO QUE UTILIZA COMO FUENTE DE CALOR UNA RESISTENCIA ELÉCTRICA COMERCIAL.	58
FIGURA 18. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN Y TEMPERATURA, EN LA SIMULACIÓN, CON UN EQUIPO QUE UTILIZA COMO FUENTE DE CALOR UN CONJUNTO DE TRES FLAUTAS QUEMADORAS DE GLP.	59
FIGURA 19. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES DEPENDIENDO DEL REFINAMIENTO DE LAS MALLAS EN EL ARREGLO CON CARBÓN.....	60
FIGURA 20. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES DEPENDIENDO DEL REFINAMIENTO DE LAS MALLAS EN EL ARREGLO CON RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	61
FIGURA 22. DISEÑO DEL PROTOTIPO AL QUE SE HA LLEGADO UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS EN VERSIÓN 14.5; MÓDULO DM (<i>DESIGN- MODELER</i>).....	65
FIGURA 23. PARTES QUE COMPONEN EL DISEÑO A EVALUAR: CARCASA Y PARRILLA...66	
FIGURA 24. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LAS ZONAS QUE SE COMPONE EL HORNO A SIMULAR.	67
FIGURA 25. ARREGLO SIMPLIFICADO QUE PERMITE LA MODELACIÓN DEL HORNO Y EL PRODUCTO CON FALSO FONDO.....	67
FIGURA 26. MALLADO EN CORTE CORRESPONDIENTE A LA GEOMETRÍA INTERIOR DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO.....	68
FIGURA 27. REFINAMIENTO DE LA MALLA PARA EL PROTOTIPO DE FALSO FONDO.....	69
FIGURA 28A. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	70
FIGURA 28B. ESQUEMA DE EVALUACIONES DEL SISTEMA DEL PROTOTIPO.....	71
FIGURA 29. RECOPIACIÓN GRÁFICA DE LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO (FABRICACIÓN DE PARTES, ENSAMBLE Y PROTOTIPO)	74
FIGURA 30. SITIOS EN LOS CUALES SE REGISTRARON LAS TEMPERATURAS EN LA PLACA RADIANTE.....	76
FIGURA 31. SITIOS EN LOS CUALES SE REGISTRARON LAS TEMPERATURAS EN LA PLACA PRECALENTADORA	77

FIGURA 32. DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO CORRESPONDIENTE AL PROTOTIPO SIMPLIFICADO Y SUS COMPONENTES PARA LA SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE FLUENT.....	78
FIGURA 33. IMÁGENES DE LA SIMULACIÓN Y TERMOGRAFÍA CORRESPONDIENTES A LAS TEMPERATURAS REGISTRADAS.	80
FIGURA 34. COMPORTAMIENTO DE LA AREPA EN EL INTERIOR DEL ARREGLO SIMPLIFICADO Y A LA SALIDA DEL HORNO.....	81
FIGURA 35. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN INCIDENTE AL INTERIOR DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO SOBRE LAS SUPERFICIES DEL PRODUCTO.....	82
FIGURA 36. RESULTADO A LA PREGUNTA CONSUMO DE AREPA TRADICIONAL ANTIOQUEÑA.....	86
FIGURA 37. RESULTADO CORRESPONDIENTE A LA PREGUNTA CON QUÉ FRECUENCIA CONSUME LA TRADICIONAL AREPA ANTIOQUEÑA.....	87
FIGURA 38. REPRESENTA EL VALOR ASIGNADO A LA TEXTURA	88
FIGURA 39. REPRESENTA EL VALOR ASIGNADO AL COLOR	88
FIGURA 40. REPRESENTA EL VALOR ASIGNADO AL AROMA.	89
FIGURA 41. REPRESENTA EL VALOR ASIGNADO AL SABOR.....	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. CONSUMO DE AREPAS -EN PESOS- POR NIVELES DE INGRESO MENSUAL PARA 2006 Y SUPUESTO PARA 2007 (RADDAR, 2006)	28
TABLA 2. CONSUMO TOTAL DE AREPAS EN PESOS POR NIVELES DE INGRESO MENSUAL PARA EL 2006 Y SUPUESTO PARA 2007. (RADDAR, 2006)	29
TABLA 3. TIPOS DE HORNOS DE COCCIÓN DE PAN (MANZANARES, 2005)	32
TABLA 4. CONSUMO DE ENERGÍA SEGÚN TIPO DE HORNO (MANZANARES, 2005).....	32
TABLA 5. PROPIEDADES DE ALGUNOS MATERIALES UTILIZADOS EN TUBOS PARA HORNOS Y SISTEMAS DE CALENTAMIENTO.....	35
TABLA 6. EFICIENCIA TÉRMICA DE UN QUEMADOR RADIANTE EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA COMBUSTIÓN	36
TABLA 7. CAMBIOS TECNOLÓGICOS E IMPACTO EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	37
TABLA 8. MEDIDAS DE DIÁMETRO Y TIEMPO DE PROCESO DE ASADO DE AREPAS EN EQUIPO GAS NATURAL	43
TABLA 9. MEDIDAS DE DIÁMETRO Y TIEMPO DE PROCESO DE ASADO DE LAS AREPAS EN UN EQUIPO ELÉCTRICO.....	44
TABLA 10. REGISTROS DE TIEMPO QUE REQUIEREN LAS AREPAS PARA LOGRAR EL ASADO	45
TABLA 11. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS SOBRE LA FUENTE DE CALENTAMIENTO EN °C.....	48
TABLA 12.REGISTRO DE LOS RESULTADOS PROMEDIOS DE TEMPERATURA Y PESO, OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS AL EQUIPO ELÉCTRICO EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.....	49
TABLA 13. REGISTRO DE LOS RESULTADOS PROMEDIOS DE ENERGÍA, CALCULADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL EQUIPO ELÉCTRICO EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.....	50
TABLA 14. REGISTRO DE LOS RESULTADOS DE INDICADORES CALCULADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS AL EQUIPO ELÉCTRICO EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.	50
TABLA 15. REGISTRO DE LOS RESULTADOS PROMEDIOS DE TEMPERATURA Y PESO OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE ASADO DE AREPAS EN EQUIPO QUE UTILIZA COMO COMBUSTIBLE GLP.	51

TABLA 16. REGISTRO DE LOS RESULTADOS PROMEDIOS DE ENERGÍA CALCULADOS CON DATOS DE LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE ASADO DE AREPAS EN EQUIPO QUE UTILIZA COMO COMBUSTIBLE GLP.	51
TABLA 17. REGISTRO DE LOS RESULTADOS DE INDICADORES, CALCULADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL EQUIPO A GLP, EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.	52
TABLA 18. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA AREPA Y COMBUSTIBLES.....	52
TABLA 19. CONDICIONES DEL MALLADO DE CADA UNO DE LOS ARREGLOS SEGÚN FUENTE DE ENERGÍA.....	53
TABLA 20. CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN EN FLUENT DEL ARREGLO QUE FUNCIONA CON CARBÓN DE LEÑA.....	54
TABLA 21. INDICACIONES PARA LA SIMULACIÓN EN FLUENT DEL ARREGLO QUE FUNCIONA CON GLP.....	55
TABLA 22. DATOS DEL MALLADO EN EL PROTOTIPO CON FALSO FONDO.....	68
TABLA 23. LISTADO DE VARIABLES TÉRMICAS A TENER PRESENTE EN LAS PRUEBAS DE MEDICIÓN.....	73
TABLA 24. DATOS DE TEMPERATURAS EN °C OBTENIDOS SOBRE LA PLACA RADIANTE	77
TABLA 25. DATOS DE TEMPERATURAS EN °C OBTENIDOS SOBRE LA PLACA PRECALENTADORA.....	77
TABLA 26. CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN AL INTERIOR DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO CON PLACAS DE FALSO FONDO.....	78
TABLA 27. VALORES DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES REQUERIDOS PARA LA SIMULACIÓN AL INTERIOR DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO CON PLACAS DE FALSO FONDO EN FLUENT.....	79
TABLA 28. REGISTRO DE TEMPERATURAS PROMEDIO EN °C, MEDIDAS EN LAS TRES ZONAS DEL PROTOTIPO, CON TERMOCUPLAS TIPO K.....	79
TABLA 29. DATOS PROMEDIO OBTENIDOS SOBRE LA AREPA EN EL PROCESO DE ASADO EN EL PROTOTIPO.....	82
TABLA 30. DATOS DE ENERGÍA PROMEDIO OBTENIDOS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	83
TABLA 31. REGISTRO DE LOS INDICADORES CALCULADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL PROTOTIPO EN EL PROCESO DE ASADO DE AREPAS.....	83
TABLA 32. DATOS PROMEDIOS DE LOS REGISTROS DEL ANÁLISIS DE GASES AL PROTOTIPO.....	85

**TABLA 33. VALORACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA AREPA
TRADICIONAL ANTIOQUEÑA.....87**

LISTA ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROCESO DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO	97
LA AREPA.....	97
Figura 1. Geometría de la arepa	97
ANTECEDENTES DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA ASAR AREPAS	97
La figura 2. Corresponde al arreglo de un equipo que funciona a carbón de leña.....	98
La figura 3. Corresponde al arreglo de un equipo que funciona con resistencia eléctrica. ..	98
La figura 4. Corresponde al arreglo de un equipo que funciona con flautas de gas licuado de petróleo (GLP).	99
MEJORAMIENTO DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	99
Figura 5. Equipo a carbón de leña.....	99
Figura 6. Equipo eléctrico.	100
Figura 7. Equipo a GLP	100
MODELOS SEGÚN FUENTE DE ENERGÍA	100
IDEAS PRELIMINARES DE PROTOTIPO	101
Figura 11. Arreglo en línea.....	102
Figura 12. Arreglo en cruz	102
Figura 13. Arreglo circular.....	103
PARTES A FABRICAR PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL ARREGLO CIRCULAR	103
Figura 14. Ducto de Humos.....	104
Figura 15. Parrilla porta arepa	104
Figura 16. Placa circular de CSi	105
Figura 17. Tapa.....	105
Figura 18. Base.....	106
ENSAMBLE DE PARTES	106
Figura 19. Ensamble del prototipo.....	107

Figura 20. Explosionado del prototipo	108
Figura 21. Renderizado del prototipo	109
ANEXO B. TABLA DESCRIPTIVA DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS	110

RESUMEN

En esta investigación se plantea la importancia de un producto base de la alimentación de una sociedad, como lo es la arepa, su equipo de cocción, y su relación con las políticas de uso racional y eficiente de la energía (URE) asociado a los lineamientos de Producción Más Limpia (PML).

En la ciudad de Medellín se concentra el mayor porcentaje del mercado nacional y donde se encuentra el mayor número de empresas y personas dedicadas a producción de arepas a nivel industrial. Actualmente, el proceso de asado de arepas se realiza con la combustión de gas o carbón de leña, abiertas a la atmósfera y en algunos casos de empresas legalmente constituidas se cuenta con hornos, de los cuales se desconocen los principales datos técnicos del equipo. Los procesos de transferencia de calor que priman son la convección, conducción y radiación de los cuales poco se conoce su influencia en el proceso de asado; lo que lleva a una situación problema de baja eficiencia energética e induce a pensar que si se aplican nuevos desarrollos tecnológicos, se puede obtener un aumento en la eficiencia térmica del proceso de asado de arepas, aproximadamente en un 15%. La difusión de los resultados de esta investigación contribuye a construir una cultura URE y PML; por tales motivos se desarrolló un prototipo de horno a escala que facilite la adopción y adaptación a las diferentes MIPYMES.

Esta tecnología consta básicamente de un sistema de combustión de GLP acoplado a una fuente radiante infrarroja de carburo de silicio focalizada a la geometría del producto. Además, el prototipo será equipado con dispositivos que permitan medir las variables térmicas del proceso de asado para garantizar el cálculo de la eficiencia de cocción del equipo y compararlas con los datos obtenidos de los equipos tradicionalmente utilizados para tal fin, garantizando las características del producto; para el caso del diseño conceptual el apoyo será de herramientas computacionales y software CFD (*Dinámica de Fluido Computacional*) de reconocimiento internacional como ANSYS FLUENT. Es así como se obtienen mejoras en la eficiencia de producción de arepas antioqueñas, se proponen alternativas de diseño de equipos y resultados económicos que son alentadores para la sociedad.

PALABRAS CLAVE: CFD, Horno para arepas, radiación infrarroja, URE.

ABSTRACT

This research highlights the importance of a staple food product of a society, and its relation to the policies of rational and efficient use of energy (RUE) associated guidelines Cleaner Production (CP).

In the city of Medellín is the highest percentage of the national market and home to the largest number of companies and individuals engaged in production at industrial level arepas. Currently, the grilling of arepas is performed with the combustion of gas or charcoal, open to the atmosphere and in some cases are legally registered with ovens, which are unknown main technical data of the equipment. The heat transfer processes that prevail are convection, conduction and radiation of which little is known about their influence on the grilling process, leading to a situation of low efficiency problem and suggests that applying new developments technology, one can obtain an increased thermal efficiency of arepas roasting process, approximately 15%. The dissemination of the results of this research contributes to building a culture ERUs and PML, for these reasons we developed a prototype scale furnace to facilitate the adoption and adaptation to different MSMEs.

This technology consists essentially of an LPG combustion system coupled to an infrared radiant source of silicon carbide targeted to the geometry of the product. Moreover, the prototype will be equipped with devices for measuring the thermal variables of the process to ensure roast efficiency calculation cooking equipment and comparing data obtained from the equipment traditionally used for this purpose, ensuring product characteristics; for conceptual design case will support computational tools and software CFD (Computational Fluid Dynamics) international recognition as ANSYS FLUENT Fluent. Thus obtained improvements in production efficiency Antioquia arepas are proposed equipment design alternatives and economic results are encouraging for the company.

KEYWORDS: Arepas oven, infrared radiation, CFD, RUEs.

1. INTRODUCCIÓN

En el panorama internacional existen propuestas correspondientes al desarrollo de las políticas establecidas para la implementación de programas de Producción más limpia (PML), Uso Racional de la Energía (URE) y desarrollo sostenible; estos lineamientos son impulsados por los diferentes organismos internacionales que promueven su inclusión, tales como: el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), FMI (Fondo Monetario Internacional), UN (Naciones Unidas), UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y organismos no gubernamentales. Las estrategias deben ser orientadas a eliminar el desperdicio y el uso innecesario de energía, sin disminuir la calidad de vida de los individuos.

En Colombia la industria alimenticia es el sector donde se encuentra la mayor cantidad de empresas registradas; realizar proyectos de Ciencia y Tecnología en este sector de la economía tendría un impacto no solo en lo económico, sino en la masificación y concientización de la cultura de Producción más Limpia (PML) y Uso Racional de la Energía (URE).

Esta investigación se enfoca en mejorar la eficiencia en el proceso de asado de las arepas tradicionales antioqueñas, un producto que se identifica con la cultura y permite avanzar en mejoras del sector de producción de alimentos. Por lo tanto, a lo largo de la investigación se definen aspectos claves como el proceso de elaboración, los principales equipos utilizados en el proceso de asado de arepas, estado de la tecnología disponible para desarrollar un equipo práctico e innovador para el proceso de asado, mejorando la eficiencia de cocción y el uso de herramientas Dinámica de Fluidos Computacional como el software Fluent que facilita el diseño conceptual de un prototipo.

2. JUSTIFICACIÓN

La propuesta del desarrollo de un prototipo de horno con placa radiante infrarroja, que aumente la eficiencia en el proceso de asado de arepas en la ciudad de Medellín, es una invitación a implementar programas de **Producción más limpia, uso racional de la energía y desarrollo sostenible**, desde la base de una sociedad de manera incluyente y significativa. Los lineamientos que vienen impulsados por diferentes organismos internacionales y que promueven su masificación, tales como: el BID, FMI, UN, UNEP y organismos no gubernamentales; a través del tiempo se concertaron tratados y eventos en los cuales los diferentes gobiernos llegaron a acuerdos para implementar leyes y normas con miras a mitigar el impacto ambiental y obtener un desarrollo sostenible; pactos como el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1997), Convención de Estocolmo (*Stockholm Convention on persistent organic pollutants*, 2001), conferencia de Río (Naciones Unidas, 1992), la convención de Basilea (Basel, 1989), Protocolo de Montreal (PNUMA, 2000), Convención de Viena (UN, 1980), han comprometido a los firmantes en establecer planes y programas fundamentados en estructuras de clase mundial para que faciliten su adopción y adaptación a los diferentes entornos (Hoof, B. 2007).

Las estructuras de Producción más Limpia (PML) y de Uso Racional de la Energía (URE), permiten maximizar la productividad, eficiencia, eficacia y la competitividad de las empresas. La capacidad de suministro y aprovechamiento óptimo de los recursos, son factores determinantes para combatir la pobreza, disminuir el impacto ambiental y lograr un mejor equilibrio social¹.

En el país la industria alimenticia es un sector donde se encuentra la mayor cantidad de empresas registradas; se ha estimado que el potencial de ahorro energético del sector es de aproximadamente entre un 10 y el 15% (área metropolitana del Valle de Aburrá, 2009).

En el área industrial local las prácticas de PML y URE no se han desarrollado al ritmo requerido, el Centro Nacional de Producción Más Limpia²; lo que sugiere el empleo de estrategias que faciliten la masificación; debido a esto se selecciona un producto como la arepa, el cual se identifica con la cultura y permite avanzar en mejoras de la competitividad del sector de producción de alimentos. El prototipo de horno desarrollado con placa radiante de carburo de silicio, instalada debidamente para el asado de arepas, permite aumentar la eficiencia del proceso de cocción en un 15%, debido al aprovechamiento del calor por radiación infrarroja, el

¹ (Alan, 2007); (Hoof, B. 2007); (Hederich, A. 2005).

² Centro Nacional de Producción Más Limpia. (19 de 09 de 2010). Manual de Introducción a la Producción Más Limpia en la Industria. Disponible en:

<http://www.metropol.gov.co/produccionmaslimpia/contenidos.php?seccion=1>

confinamiento del calor convectivo y la transformación del horno discontinuo en continuo. Estas condiciones serán analizadas en el prototipo, gracias a la disponibilidad de las herramientas computacionales y el software ANSYS FLUENT.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existen condiciones en el proceso de asado de arepas que no favorecen la eficiencia energética como lo son: la exposición a la temperatura ambiente, poco o nulo aislamiento térmico, poca o nula recuperación de calor, quema de combustible sin carga, poca o nula radiación infrarroja, no se conocen datos de la combustión y los residuos de esta, no existe control de las temperaturas de trabajo ni del producto, control de tiempo de exposición del producto, datos técnicos de los equipos, registros y recomendaciones de mantenimiento, entre otros. Todo lo contrario a los requerimientos de calidad de clase mundial que proponen las políticas de PML y a los propósitos de URE.

2.2 SÍNTESIS DEL PROBLEMA

Tradicionalmente las arepas se han asado mediante el aprovechamiento del calor emitido por la combustión de carbón de leña, gas natural (GN), gas licuado de petróleo (GLP) y por resistencias eléctricas.

La quema de carbón de leña presenta un comportamiento que poco favorece a las políticas PML y URE (ver Figura 1), porque el manejo es bastante incómodo y pone en riesgo la salud física de los operarios debido al calor excesivo, el humo, gases de combustión, cenizas y compuestos volátiles que están presentes durante y después del proceso, estas condiciones se oponen a la aceptación del producto en el mercado.

Figura 1. Descripción gráfica de los equipos utilizados en Medellín y su área metropolitana, para la elaboración de arepas, utilizando leña y carbón de leña como combustible.



Infraestructura física



Cocción del maíz



Estante de enfriamiento



Recipiente de combustión



Asado



Residuos del proceso

Fuente: Elaboración propia

En general el gas (GN y GLP), es el combustible más limpio y se puede controlar su combustión mediante los dispositivos de regulación. El uso de la red de gas natural (GN) facilita la producción en puestos fijos; y las pipetas de Gas Licuado del Petróleo (GLP) se utilizan para puestos móviles (ver Figuras 2 y 3). Aunque el equipo de producción de arepas a gas es de mayor costo que el de carbón de leña por poseer mayores componentes tecnológicos, el beneficio en comodidad, seguridad y limpieza es notorio.

Figura 2. Descripción gráfica de los equipos utilizados en Medellín y el área metropolitana, para la elaboración de arepas, utilizando como combustible Gas Natural.



Infraestructura física



Estante de enfriamiento



Asado antes



Asado después



Punto de venta

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Descripción gráfica de los equipos utilizados en Medellín y el área metropolitana para la elaboración de arepas utilizando como combustible GLP



Cocción de maíz



Molienda



Recipiente de combustible



Asado



Producto terminado

Fuente: Elaboración propia

La utilización de resistencias eléctricas para el asado de arepas presenta baja demanda por parte de las empresas dedicadas a este negocio, no se tienen datos de fabricantes que tengan producción con este tipo de energía.

La diferencia en el precio se constituye en el argumento principal para preferir el gas (GN o GLP) a la energía eléctrica; pero el concepto BPM (Buenas Prácticas de Manufactura) y PML, serían los elementos a favor del uso de esta última, ya que desde estos conceptos, en la energía eléctrica los niveles de contaminación solo se asocian con la liberación de calor al medio; a diferencia del carbón de leña y el gas, que se castigan por efectos de la emisión de gases de combustión.

Por lo tanto, el gas presenta una ventaja económica por ser de menor costo que la energía eléctrica y al mismo tiempo es más “limpia” que el carbón de leña; que es el más “económico” de los tres combustibles utilizados en el proceso de asado de arepas.

2.3 HIPÓTESIS

Un prototipo de horno desarrollado con placa radiante de carburo de silicio instalada debidamente para el asado de arepas, permitirá aumentar la eficiencia del proceso de cocción en un 15%, debido al aprovechamiento del calor por radiación infrarroja, el confinamiento del calor convectivo y la transformación del horno discontinuo en continuo; condiciones que en la actualidad no son aprovechadas suficientemente en los asadores a carbón de leña, gas natural o gas licuado.

2.4 OBJETIVOS

General. Desarrollar un prototipo de horno con placa radiante infrarroja que aumente la eficiencia energética en el proceso de asado de arepas en la ciudad de Medellín.

Específicos

- Diseñar y construir a escala de laboratorio un prototipo de horno continuo para asado de arepas; con geometría radiante, aplicando diseño conceptual detallado y simulación CFD.
- Evaluar el desempeño del prototipo por medio del cálculo de la eficiencia de cocción y determinación estadística en la calidad del producto.

3. MARCO TEÓRICO

Con el correr del tiempo y la emergencia económica del país, ha hecho que las arepas se conviertan en parte de la cotidianidad alimentaria del pueblo antioqueño, lo que ha impulsado la creación de maquinaria y equipos que permitan la industrialización del producto, la proyección a la producción alta, limpia y económica.

3.1 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una recopilación de información general sobre la arepa, la forma como se ha asado tradicionalmente, la estructura comercial, los hornos e industrias similares así como algunos procedimientos y normas a tener presente en el cálculo de la eficiencia energética y las características principales del software CFD.

3.1.1 Reseña histórica. Las arepas inicialmente fueron asadas en cayanas, (pieza de material cerámico)³, a medida que ha transcurrido el tiempo se han desarrollado nuevos materiales. Las cayanas fueron reemplazadas por láminas metálicas que agilizaban el proceso con el inconveniente que con el tiempo se deterioraban causando rupturas; éstas permitían el paso de la luz emitida por las brasas radiantes del carbón de leña. Este fenómeno permitió la aparición de la parrilla de alambre o metálica que facilita el aprovechamiento del calor por radiación. Con la estufa eléctrica y sus parrillas radiantes se garantiza la limpieza del producto y la comodidad de las personas.

En 1992 Colombia tiene una crisis energética la cual obliga a la adopción del gas natural como combustible sustituto para la cocción de alimentos y crea la necesidad de adoptar y adaptar los desarrollos tecnológicos que se presenten en lo referente a dicho combustible. Es por esto que la naciente industria de las arepas se ve obligada a incorporar la tecnología disponible para mantener su existencia en el mercado, sin implicar necesariamente estudios de equipos y accesorios óptimos para su funcionamiento y que garantizaran la calidad del producto.

En la **Figura 4** se realiza una descripción gráfica de las formas en las que se ha utilizado tradicionalmente el calor en el proceso de asado de arepas. En la figura 4 a. se destaca un sistema rústico pero eficiente del aprovechamiento de la energía suministrada por la leña, en el cual el calor convectivo se confina en un horno de

³ Estrada, 2006

barro acondicionado para calentar la olla de cocción ; por otro lado, la cayana calienta la arepa aprovechando el calor conductivo y luego ésta se coloca en la parrilla metálica para ser sometida al calor infrarrojo producido por las brasas resultado del carbón de leña. Se puede observar el caso de la parrilla al carbón de leña (Figura 4b), la cual es muy utilizada hoy en día por la proliferación de negocios callejeros, se aprovecha el calor radiante infrarrojo pero se desprecia el aporte convectivo por estar expuesto al ambiente; de igual forma sucede en el caso de la parrilla eléctrica (Figura 4c) y en el asado en estufa a gas (Figura 4d), aparte de no existir prácticamente radiación infrarroja se combinan la ausencia de conducción y convección en un porcentaje significativo con relación a la geometría del producto.

Figura 4. Recopilación gráfica de la evolución en el proceso de asado de arepas.



4a



4b



4c



4d

Fuente: Elaboración propia

Un estudio realizado por el Cinset (*Corporación para la Investigación Socioeconómica y Tecnológica de Colombia*) denominado “Integración de la mini cadena productiva del maíz en Pereira”, escogió a los comercializadores de arepas en puntos de venta improvisados en las puertas de las casas, para implementar el proyecto que busca la transformación organizativa, productiva, comercial y personal de esta actividad económica solo con la capacitación; ya se perciben los resultados al ver incrementadas sus ventas hasta en un 50%. Una de las novedades del proyecto es el tema de aseo y manipulación de alimentos; el proceso continúa con la campaña de responsabilidad ambiental que pretende disminuir el consumo de leña e instruir un mejor manejo al carbón y las cenizas⁴.

Según Sánchez (2002), en Colombia la industria de la arepa ha importado máquinas tortilladoras adaptadas para su producción; algunos fabricantes nacionales ofrecen sistemas de asado de arepas que funcionan con gas, carbón y eléctricas; pero se desconocen las características térmicas de los equipos, esto permite pensar que la similitud, tanto del producto como del proceso de asado, pueden servir como punto de partida para una propuesta comparativa de parámetros térmicos.

3.1.2 Arepas. El maíz es la materia prima para las arepas; proviene de varios países y diferentes cosechas; día a día se mejoran las variedades de maíz para obtener un mayor rendimiento, masas más suaves, contenido de almidones y grasas que satisfagan los requerimientos internacionales. En el mercado se conocen las siguientes designaciones: maíz QPM blanco, QPM amarillo, Híbrido AM, PAB SA4 y maíz común; la variedad más utilizada para la producción de arepas antioqueñas tradicionales es el maíz QPM blanco y el maíz común.

Algunas propiedades térmicas de la masa de maíz o productos semejantes son:

Arepa

$C_p = 1.4857 \text{ Kj/Kg } ^\circ\text{K}$ promedio

$T_i = 23^\circ\text{C}$ temperatura inicial;

$T_f = 94^\circ\text{C}$ temperatura final

Tanto **T_i** como **T_f** corresponden a temperaturas utilizadas en el proceso de asado. (Marín Paula, 2003)

⁴ Ferro, 2009

Envuelto de mute

Capacidad calorífica = 3.396 (Kj /Kg °C);
Conductividad térmica= 0.555 (W/m°C);
Difusividad = 0.151 (mm²/s);
Densidad = 1081.390 (Kg/m³)⁵.

3.1.3 El mercado de las arepas. La arepa no solo es comida y tradición sobre la mesa, también es un negocio de más de 127 Mipymes y grandes fábricas; al tiempo que la producción se tecnifica, el mercado crece y toma forma⁶.

A continuación se presenta parte de un estudio llamado “**El consumidor colombiano análisis de comportamiento de consumo en 2005 y 2006 y forward para 2007**”. Éste se refiere al comportamiento en el mercado de una gran cantidad de productos alimenticios, base de la alimentación en Colombia, entre ellos, la arepa. (Raddar, 2006)

De los resultados del estudio se tiene que en diciembre de 2006 el colombiano en promedio consumió \$4.870 en arepas precocidas, como se ve en la tabla 1. Esto significa el 4,6044% de su nivel de ingresos mensual. Al sumar todos los consumidores se determina un mercado total de \$228.344.888.942 de pesos en el mes de diciembre de 2006, siendo este el 100,00% del total del consumo nacional en el año, como lo muestra la tabla 2; además se realiza un estimativo del mercado del producto para el año 2007 en cada una de las tablas anteriormente mencionadas.

Tabla 1. Consumo de arepas -en pesos- por niveles de ingreso mensual para 2006 y supuesto para 2007 (Raddar, 2006)

NACIONAL	2006 (\$)	2007 (\$)
Ingresos bajos	\$3.637	\$10.798
Ingresos medios	\$6.407	\$13.274
Ingresos altos	\$8.990	\$12.624
TOTAL	\$4.870	\$11.594
Nacional	\$4.870	\$11.594

⁵ O. Rodríguez

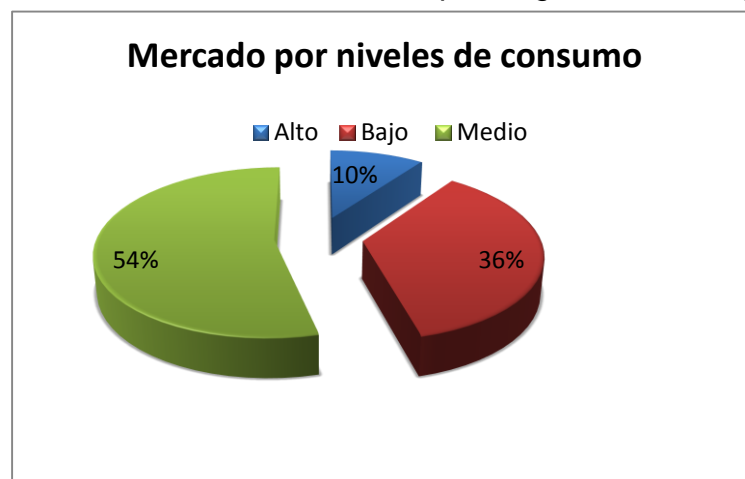
⁶ Garzón Ronaldo, 2010

Tabla 2. Consumo total de arepas en pesos por niveles de ingreso mensual para el 2006 y supuesto para 2007. (Raddar, 2006)

NACIONAL	2006 (\$)	2007 (\$)
Ingresos bajos	\$98.121.175.537	\$296.242.382.179
Ingresos medios	\$116.985.680.788	\$246.367.105.554
Ingresos altos	\$14.839.274.678	\$21.177.620.526
TOTAL	\$228.344.888.942	\$552.731.719.301
Nacional	\$228.344.888.942	\$552.731.719.301

En la **Figura 5** se puede ver cómo estuvo la distribución del mercado de las arepas a nivel nacional en el año 2006 según el nivel de ingresos de la población, predominando el consumo del estrato medio, seguido por el estrato bajo y por último el estrato alto, con apenas un 10% del total del mercado.

Figura 5. Distribución del Mercado de las arepas según nivel de ingresos.⁷

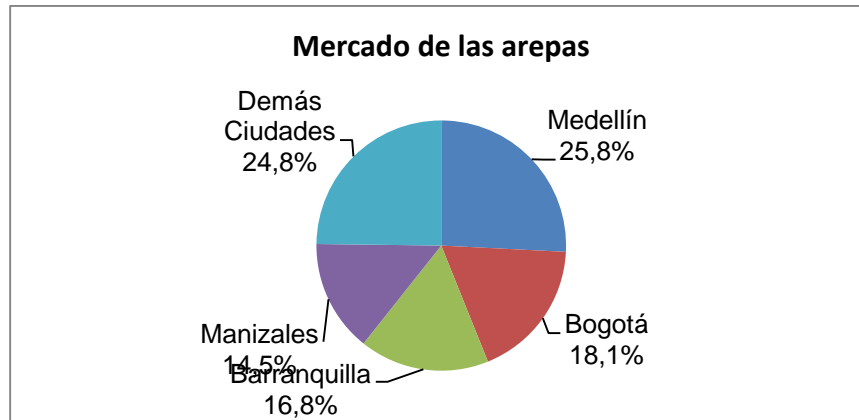


Fuente: (Raddar, 2006)

Parte del estudio muestra que el mercado de las arepas se distribuye preferiblemente como se aprecia en la Figura 6.

⁷ Raddar, 2006

Figura 6. Distribución del mercado de arepas en las principales ciudades de Colombia.



Fuente: Raddar, 2006. Adaptación propia

Estos indicadores permiten definir a la ciudad de Medellín como el lugar donde se concentra la mayor parte del mercado de las arepas, y por lo tanto la más indicada para impulsar desarrollos tecnológico, que permitan a las empresas dedicadas a esta actividad, mejorar su productividad.

Otro artículo más reciente (2009) publicado por la revista Portafolio en su portal web, titulado “**Hacer arepas se vuelve una industria eficiente**”; muestra que el crecimiento esperado para el año 2009 fue del 25%⁸.

El auge de nuevas pequeñas fábricas se atribuye a que ante el desempleo o la necesidad de crear un negocio propio, la gente lo considera una actividad de baja inversión y tecnología. Pero si se quiere tener una marca recordada, exitosa y exportar, hay que hacerlo con buenas prácticas sanitarias y equipos de última tecnología, lo que requiere de inversiones considerables⁹.

3.1.4 Hornos en la industria alimenticia. Los hornos son diseñados para cocinar, hornear o texturizar, optimizando los resultados en calidad, menos tiempo y costos de energía más bajos; en los hornos las variables más importantes son: temperatura de operación y tiempo al que se somete la materia prima¹⁰; los hornos para cocción de alimentos de acuerdo a la operación pueden ser continuos o discontinuos y funcionan a una temperatura oscilante entre 150 y 200°C; en general, los hornos continuos son 5% más eficientes que los discontinuos¹¹.

⁸ Portafolio, 2010

⁹ Garzón Ronaldo, 2010

¹⁰ Alan, 2007

¹¹ Martín, 2005

La información sobre cómo manipular un horno en óptimas condiciones de funcionamiento para producir de forma eficiente una arepa de alta calidad, hasta el momento no se encuentra en la literatura; incluso, en hornos de la industria panificadora, que es donde a nivel mundial se ha creado una conciencia de mejoramiento continuo, es complejo encontrar este tipo de material bibliográfico. Las dificultades encontradas en los productos horneados son muy comunes debido a la irreversibilidad del proceso de cocción, el cual genera pérdidas significativas.

La falta de una buena comprensión del proceso de cocción crea contratiempos e impide la implementación de tecnologías de avanzada en el diseño de hornos y equipos que permitan mejorar su eficiencia.

Físicamente el horneado puede ser descrito como un proceso de transferencia de calor desde el exterior hacia el interior del producto; en el interior el agua líquida y el vapor de agua transportan el calor por conducción, es allí cuando se eleva la temperatura de la masa desde la superficie hasta el centro, la conducción actúa entre el producto y las parrillas que lo contienen desde la superficie exterior del producto hacia el interior; y la radiación está presente entre las paredes del horno hacia el producto o de la fuente de calor hacia el medio, haciendo del proceso un modelo que se puede replicar. Por lo tanto, la conducción y la radiación producen un efecto de calentamiento localizado; de otra parte, la convección tiende a crear una distribución uniforme de calor en la cámara de cocción.

3.1.5 Horno de rayos infrarrojos. Es aquel en el cual un material sólido se lleva a calentamiento a baja o media temperatura por medio de la emisión de rayos infrarrojos producidos por una fuente de este tipo de radiación. (NMX-R-101-1974, 1974).

Cuando se utiliza calor infrarrojo la energía es focalizada directamente sobre el producto, el secado ocurre en corto tiempo, el flujo de calor es proporcional a las temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia el calor penetra uniformemente en los alimentos y produce una diferencia en apariencia, gusto y textura. Lam, H. (1999).

3.2 LAS INDUSTRIAS SIMILARES

3.2.1 La industria del pan. Los hornos utilizados en esta industria consumen de forma directa más del 60% de la energía, se diseñan en función del producto a cocer para utilizar fuego directo o indirecto y pueden ser operados en continuo o por cargas y se fabrican según el sistema de alimentación; su clasificación se observa en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Tipos de Hornos de cocción de pan (Manzanares, 2005)

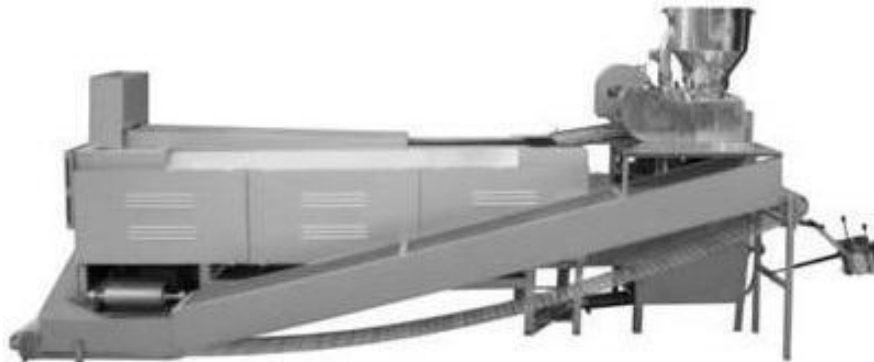
Alimentación	Tipo de horno	Modelo/clase
Continuos	Túnel	De cinta o Red De bandeja
	Solera	Fija Giratoria
Discontinuos	Cámara o Piso	Ciclo térmico Tubos anulares
	Carros	Fijos, ciclo térmico Fijos, tubos anulares Rotativos

Tabla 4. Consumo de energía según tipo de horno (Manzanares, 2005)

Fuente de calor	Tipo de Horno		
	Carros Rotativos	Cámaras Superpuestas	Túnel Continuo
Gas Natural (m³/t)	50	46.1	47.5
Propano (kg/t)	47.1	43.5	45
Gasóleo (m³/t)	61	57.7	59.7
Energía Eléctrica Térmica (kWh/t)	484.9	437.4	465.1

3.2.1 La industria de tortillas Mexicanas. Los combustibles aportan su calor al equipo de cocción en forma directa o indirecta, pueden ser manuales, de energía eléctrica, a gas, o una combinación de las anteriores; el gas debe suministrarse a una presión máxima de 147,099 kPa (1,50 kgf/cm²) después de alcanzar la estabilización térmica (220°C ± 30°C) en la parte superior. Las máquinas se componen de una tolva de alimentación de masa, un cuerpo con tapas de acero inoxidable (Sistema de cocción), sistema de transmisión por cadena, rodillos y bandas transportadoras y el sistema de recolección para el enfriamiento; son de fácil mantenimiento y ocupan espacios mayores a 3 m de ancho por 6 metros de largo y requieren de instalaciones eléctricas y de suministro de gas. (Sánchez, 2002) Ver Figura 7.

Figura 7. Representación de una máquina tortilladoras ¹²



Fuente: Tomado de <http://www.lohechoenmexico.mx/?p=4679>

Uno de los productos que más se asimila a la cocción de arepa es la tortilla de maíz mexicana, con especificación sello fide número ESP 4445 para máquinas tortilladoras mecanizadas para maíz, que en uno de sus capítulos contempla la relación de valores mínimos de producción de tortillas y consumo de combustible o energía eléctrica. Los modelos de las máquinas tortilladoras mecanizadas deben cumplir con las exigencias del sello (FIDE, 2009).

3.2.2 Producción de Pitas (pan árabe) con placas IR. Los emisores de infrarrojos son fuentes modernas de calor sin ningún tipo de pre-calentamiento y con el aporte de energía muy eficiente, el calor se aplica precisamente donde se requiere y tienen una respuesta muy rápida (la respuesta de encendido es de 1.2 segundos), pueden ser fácilmente controlados, lo cual es muy importante para la calidad de los alimentos; están diseñados para la reconversión de equipos de gas; su selección depende del proceso y la facilidad de adaptación.

La **Figura 8** muestra la adaptación de un equipo de funcionamiento a gas, convertido a paneles radiantes a gas. Se puede lograr disminuir drásticamente los costos de funcionamiento ya que cada panel tiene la posibilidad de un control individual, según los requerimientos del proceso.

¹² Ibídem

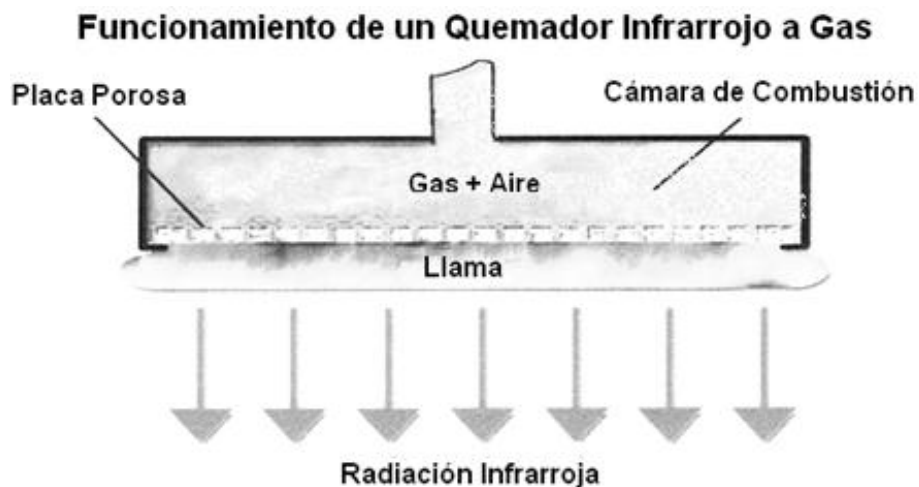
Figura 8. Equipo con quemadores infrarrojos para fabricar pan árabe ¹³



3.3 QUEMADORES RADIANTES

Los quemadores radiantes funcionan por combustión de un combustible fósil. El combustible y el aire son premezclados y se queman, ya sea justo dentro de la superficie radiante o por encima de ella. Esto calienta una superficie sólida la cual irradia rayos infrarrojos de energía a una carga, como se aprecia en la Figura 9.

Figura 9. Funcionamiento de un quemador infrarrojo a gas con llama por encima de la superficie radiante. ¹⁴



Fuente: Tomado de Consumer Eroski 2007 y modificado por el autor

¹³ Infraglo, 2010

¹⁴ Consumer Eroski 2007

Estos quemadores se utilizan en aplicaciones industriales para secado de papel y cartón, secado de madera, curado de plásticos, cocción y preparación de alimentos entre otros¹⁵.

Existen ventajas como: alta eficiencia térmica, bajo nivel de emisión de contaminantes, tiempo de respuesta muy rápida a los cambios de carga, etc. Los principales parámetros a tener en cuenta para su elección o diseños son: densidad de potencia, eficiencia radiante, calor superficial y bajo nivel de emisiones de contaminantes¹⁶.

Los materiales con los que se fabrican son aceros con alto contenido de cromo, silicio, fibra metálica sin perforación, fibra metálica con perforación, placa metálica frontal, cerámica reticulada, recubrimiento cerámico, recubrimiento cerámico con choque de llama pero estos han sido desplazados por los de carburo al silicio¹⁷.

Las características principales que hacen que se utilice uno u otro material, se especifican en la tabla 5, y muestra como es el comportamiento de cada uno respecto a la conductividad térmica, dilatación térmica y temperatura de servicio, variables que se deben tener presentes al momento de aplicar un diseño a determinado proceso.

Tabla 5. Propiedades de algunos materiales utilizados en tubos para hornos y sistemas de calentamiento¹⁸.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m-K)	DILATACIÓN TÉRMICA* ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	TEMPERATURA DE SERVICIO ($^{\circ}\text{C}$)
ACERO REFRACTARIO	30 Aprox.	17,8 – 18,7	1000 Max.
ALÚMINA	6,3	8,2	1750
CARBURO DE SILICIO	77,5 – 125,6	4,7	1100**

*Propiedades medidas a temperatura cercana a 1.000 $^{\circ}\text{C}$

**En atmósfera rica en oxígeno

Del estudio realizado por Amel (2006, *et al*), se conoce el comportamiento térmico y se obtienen gráficos que relacionan la potencia específica y la eficiencia de radiación según el factor de aireación; además se pueden obtener relaciones entre potencia específica y eficiencia de la radiación con diferentes temperaturas del

¹⁵ Amel, 2006, Copete, *et al*

¹⁶ Newby, 2003

¹⁷ Amel, 2006, *et al*

¹⁸ Vargas Fabio, 2009

ambiente. Debe anotarse que la geometría en la que se realizaron estos estudios corresponde a un tubo radiante.

3.3.1 Eficiencias de los quemadores radiantes. Un estudio realizado en 1997 por *Gas Research Institute*, R.F. Speyer, W.Y. Lin, and G. Agarwal, *Exp. Heat Transfer*, 9, 213–245, 1996.33, a cuatro diferentes tipos comerciales de quemadores radiante a gas; un quemador de fibras metálico (Fe-Cr-Al) (0.40 m de diámetro), otro de cerámica reticulada constituidos por un manto poroso de ($Mg_2 Al_4 Si_5 O_{18}$), un quemador cerámico poroso de ($Al_6 Si_2 O_{13}$), y un quemador de choque de llama, muestra la eficiencia térmica de un quemador radiante en función de la intensidad de la combustión, como se muestra en la tabla 6. Aquí se destaca el comportamiento del tipo de las placas existentes acordes con una eficiencia térmica requerida para la aplicación que se desea.

Tabla 6. Eficiencia térmica de un quemador radiante en función de la intensidad de la combustión

Tipo de quemador radiante	Intensidad de la combustión (kW/m ²)	Rango de Eficiencia térmica (%)
Sin Perforación	150 - 540	18 - 26
Con Perforación	150 - 540	16 - 26
Con perforación y placa metálica frontal	100 - 440	22 - 38
Cerámica reticulada	150 - 630	27 - 39
Recubrimiento Cerámico	140520	37 - 54
Choque de llama	150 - 430	46 - 52

Fuente: Baukal E., 2003.

En 1998 un estudio realizado por *Pettersson and Stenström*, buscó mostrar la eficiencia térmica de los paneles radiantes infrarrojos que funcionan tanto con gas como con electricidad. Ambos paneles radiantes, son utilizados comúnmente; sin embargo, en un proceso de secado de papel donde se utilizaron tanto quemadores de infrarrojos a gas como eléctricos, los resultados dieron una eficiencia del 30% para la secadora que funciona con gas y del 40% para la eléctrica, lo que causó una considerable incertidumbre en las mediciones debido a la dificultad de obtener mediciones precisas de la humedad del papel (Baukal E., 2003).

El resultado presenta una comparación de eficiencias de equipos para la cocción de alimentos que funcionan con diferentes tecnologías como gas (43%), eléctrica (44%) y la vitrocerámica (51%), las cuales son de total interés para este estudio, ya que presentan componentes que se pueden utilizar para el desarrollo de una tecnología híbrida que convine el combustible gaseoso, el quemador radiante de la

vitrocerámica a gas y que permita una mejora en la eficiencia al compararla con la placa eléctrica.

De otra parte, en Japón la eficiencia de algunas clases de cocina con placa vitrocerámica a gas con quemadores cerámicos radiantes, es sólo alrededor del 30% en condiciones de arranque en frío, dado que la eficiencia de la placa eléctrica es aproximadamente del 80% en cocinas de inducción; entonces, las placas a gas no son lo suficientemente competentes, esta es la razón por la cual la vitrocerámica de gas no se ha comercializado a gran escala. Tokio Gas y Rinnai han resuelto este problema y han conseguido hacer prototipos a gas con más del 40% de eficiencia, y se estima que podría superar el 45%. Las tecnologías que ahora se han desarrollado son simples y por lo tanto se podrían adaptar a diversas placas en todo el mundo¹⁹.

En un estudio llamado *Uso racional y eficiente de la energía* en unidades micro empresariales de Medellín, en la matriz de modelo de gestión para las alternativas tecnológicas, se plantean cambios tecnológicos para aumentar la eficiencia energética en los dispositivos que utilizan las diferentes fuentes de combustible y plantean mejoras en la eficiencia de los equipos una vez realizada la modificación. En la tabla 7 se muestran los valores de eficiencia energética actual para equipos que funcionan con parrillas eléctricas, a gas natural, madera y/o carbón de leña, y se plantean posibles modificaciones que permiten incrementar la eficiencia de los equipos.

Tabla 7. Cambios tecnológicos e impacto en la eficiencia energética

ELECTRICIDAD	GAS NATURAL	MADERA		CARBÓN
$\eta_e = 55 \%$	$\eta_{gas} = 45 \%$	$\eta_m = 17 \%$		$\eta_C = 10 \%$
Realizando modificaciones tecnológicas				
Eléctricas a gas	Quemador eficiente a gas	Estufa eficiente de leña	Estufas de gasificación	No registra
No aumenta la eficiencia	Aumenta la eficiencia			No registra
	15%	15%	18%	

Fuente: Tomado de Cambios tecnológicos e impacto en la eficiencia energética y modificado para dar claridad (Acevedo Carlos, et all 2012)

¹⁹Tokyo Gas Co. Ltd., (2010), Yamada, Yutaka; Rinnai Corporation Oyaizu, Masatoshi; Sobue, Tsutomu.

3.4 MÉTODO PARA LA PRUEBA DE LA EFICIENCIA DE PLACAS

Esta prueba se realiza según la norma JIS (*Japanese Industrial Standards*), método cf. JIS S 2103.

- Preparar una olla de aluminio de diámetro 20 cm, llena con 2 litros de agua, para una potencia de entrada entre 2 y 2.4 kW.
- Cubrir la olla y ponerla sobre un quemador de prueba.
- Encender el quemador y cuando la temperatura del agua aumente 45°C, superior a la temperatura inicial, se empezará a agitar el agua con un agitador que garantice la homogeneidad térmica en el sistema.
- Se deberá mantener en agitación y se cortará el gas cuando la temperatura del agua llegue a 50°C, por encima de la temperatura inicial.
- Mantener en agitación y registrar la temperatura máxima alcanzada. (incluyendo calor residual).

La eficiencia será el cociente de la suma de las cantidades de calor absorbido por el agua y la cantidad de calor consumido en el quemador. Este método de análisis no utiliza precalentamiento, por lo tanto tiende a ser un 5% menor que si se precalentara el agua; además, el calor absorbido por el recipiente no está incluido.

La eficiencia de los prototipos de placas de cocción domésticos y comerciales diseñados y analizados con esta metodología entregaron un 43.5% para la placa doméstica (potencia de 3kW) y un 39% para la comercial (potencia de 8kW)

Existe también la norma ASTM1521-03 "*Standard Test Methods for Performance of Range Tops*" cuyo objetivo es analizar el comportamiento de los equipos de cocción y para evaluar la operación y desempeño tanto para equipos a gas como eléctricos (ASTM, 2003).

La norma específica la determinación de:

- Potencia de entrada, respuesta al calentamiento y uniformidad de la temperatura de los alimentos, eficiencia energética de cocción y la capacidad de producción.
- Contempla los dispositivos, equipos de medición y procedimientos específicos para la obtención de los resultados.

La eficiencia se obtiene mediante las ecuaciones siguientes:

$$\eta_{\text{cocción}} = \frac{E_{\text{salida}}}{E_{\text{entrada}}} \quad (1)$$

$$E_{\text{salida}} = E_{\text{agua}} + E_{\text{recipiente}} \quad (2)$$

$$E_{\text{salida}} = \left[(W_{\text{agua}} * C_{p_{\text{agua}}}) + (W_{\text{recipiente}} * C_{p_{\text{recipiente}}}) \right] * (T_2 - T_1) \quad (3)$$

- W_{agua} = peso de agua en el recipiente, especificado como 1.500 ó 800 gr de agua,
 $C_{p_{\text{agua}}}$ = calor específico del agua = 1.0 kcal/kg°K,
 $W_{\text{recipiente}}$ = peso del recipiente de cocción, (pot≈800g +lid≈190g)
 $CP_{\text{recipiente}}$ = calor específico del recipiente de cocción, aluminio = 0.22 kcal/kg. °K.
 O acero = 0.11 kcal/kg°K,
 T_2 = temperatura de salida del agua a 85°C (ò 90 ò 95 °C).
 T_1 = temperatura inicial del agua, con esta especificación 25°C.
 E_{entrada} = consumo energético durante la prueba de cocción en kW, incluida la energía eléctrica consumida por la estufa a gas.

En Colombia la forma como se debe medir la eficiencia de un gasodoméstico para la cocción de alimentos se encuentra especificada en la norma NTC2832 - 1, parte dos, uso racional de la energía. En élla se plantea un procedimiento y ecuaciones de cálculo similares a la norma ASTM1521-03 (NTC, 2001).

3.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La CDF (*Computational Fluid Dynamics*), proporciona información cualitativa y cuantitativa de la predicción del flujo de fluido, permite desarrollar simulaciones en un laboratorio virtual, lo que facilita predecir el comportamiento y conocer datos de las variables involucradas en el proceso.

Usando CFD es posible representar un sistema o equipo que se quiera estudiar, especificando las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual; y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido con gran detalle; ayudando al diseño, prototipaje, visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido.

En la industria alimenticia el uso de CFD ha permitido avances significativos en el aprovechamiento energético, calidad de los productos y mejoras en la productividad, pensadas desde el diseño. Las aplicaciones más recientes incluyen procesos como la cocción, secado, limpieza, esterilización, refrigeración, atomización o pulverizado, que se fundamentan en los fenómenos de

transferencia de calor como la conducción, convección y radiación²⁰; industrias como la del pan, cereales, snacks, frutas y hortalizas, carnes, pollos, pescados y mariscos, han utilizado el CFD en aplicaciones con infrarrojos para mejorar la aceptación del consumidor así como en diferentes procesos térmicos²¹.

Una metodología basada en CFD se ha establecido para el modelado de transferencia de calor y flujo de fluidos dentro de un horno de gas residencial. En este se encuentran los fenómenos de transferencia de calor de los quemadores del horno, la placa deflectora y las paredes del recubrimiento. Los experimentos son llevados a cabo con tomografía infrarroja y termopares; como resultado se observó un 6% de discrepancias con los datos experimentales; esta herramienta puede ser utilizada para predecir los parámetros de diseño del horno²².

²⁰ Shin-Yee Wong a, 2007

²¹ PO Logerais a, 2010, Nalan Uysal G. S., 2009

²² Hiteshkumar Mistry a, 2011

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A la hora de diseñar un equipo, sus partes, plantear su temática, enfoque y límites se deben delinear las ventajas y las desventajas de la improvisación, imaginar su desarrollo y ajuste, es así como luego de un trabajo de campo con todos sus ensayos y ajustes se presenta el **prototipo de horno con placa radiante infrarroja que aumente la eficiencia en el proceso de asado de arepas en la ciudad de Medellín.**

4.1 EQUIPOS PARA REALIZAR MEDICIONES Y PRUEBAS

Para la toma de medidas de las variables involucradas en el proceso de asado de arepas en el prototipo y equipos de comparación, se emplearon diferentes instrumentos y equipos pertenecientes al laboratorio de ciencias térmicas del ITM y se contó con la colaboración del personal encargado del laboratorio.

En el Anexo B. se realiza una descripción de los equipos utilizados y en la Figura 12 se tiene un registro gráfico de la aplicación de cada uno en las diferentes etapas del proceso de diseño.

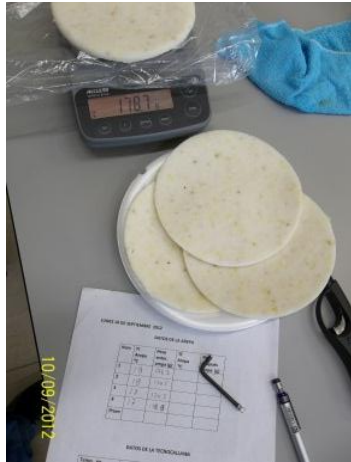
Figura 10. Evidencias de los registros y equipos utilizados.



Termómetro. Termocupla. Pirómetro



Analizador de gases



Balanza



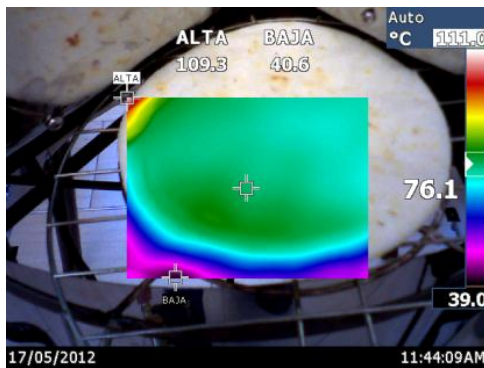
Manómetro. Cronómetro. Gasómetro



Analizador de gases



Multímetro amperímetro



Cámara termográfica



Cámara termográfica

Fuente: Elaboración propia

4.2 ELABORACIÓN DE LAS AREPAS

En este estudio las arepas se prepararon obteniendo masa del mismo proveedor, el cual mantiene las condiciones estables para producirla, el siguiente paso consiste en amasar para dar mejor homogeneidad, consistencia suave y mejor adherencia en la masa; para dos (2) kg de masa se dedican aproximadamente 5 minutos; a continuación la masa es porcionada manualmente y sometida a moldeo utilizando el molde número 17 que equivale a 170 mm de diámetro, altura de 6 mm, material de acero inoxidable calibre 24; para facilitar el moldeo y desmoldeo se utiliza una película plástica, la cual impide que la masa se adhiera a las paredes del molde por efectos de la presión ejercida por un rodillo que se utiliza para obligar la forma, seguidamente se retiran los excedentes de masa y se pesa en la balanza determinada para tal fin, el peso promedio obtenido es de 168+/- 1 gr.

La arepa ya formada y pesada se somete al proceso de asado en los equipos alimentados con GN y resistencia eléctrica. El objetivo es determinar el punto de cocción requerido, debido a que se desconoce un parámetro que indique el momento en que se considera que el producto se encuentra en condiciones óptimas para empaquetado, almacenamiento y distribución. Se considera que la contracción diametral puede ser un indicador que permita determinar esta condición del producto, por similitud con los procesos de extracción e inyección de polímeros²³. El resultado de las pruebas se observa en las **tablas 8 y 9**.

Tabla 8. Medidas de diámetro y tiempo de proceso de asado de arepas en equipo gas natural

t. (sg)	Φ exterior de la arepa en (mm)					Promedio (mm)
	1	2	3	4	5	
0	170	170	170	170	170	170
60	169	169	169	169	169	169
110	168	168	168	168	168	168
160	165	167	165	166	167	166
210	164	165	164	165	165	164,6
260	164	164	161	164	163	163,2
310	160	161	160	161	161	160,6

Fuente: Elaboración propia.

²³ Meré Marcos (2009), *et al*

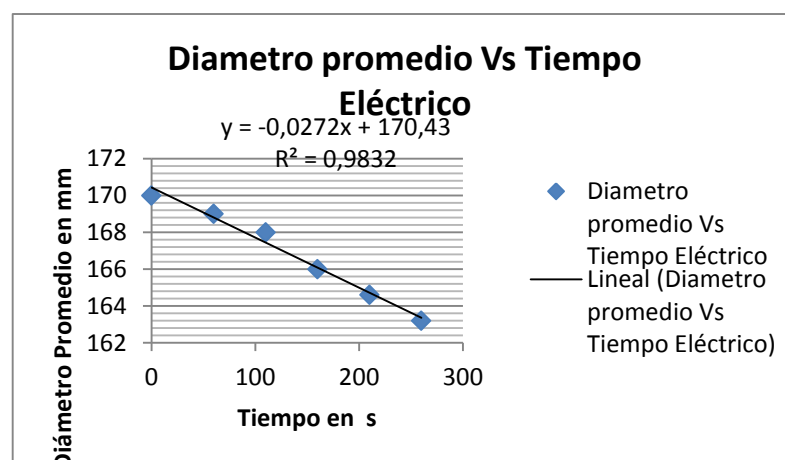
Tabla 9. Medidas de diámetro y tiempo de proceso de asado de las arepas en un equipo eléctrico

t. (sg)	Φ exterior de la arepa en (mm)					Promedio (mm)
	1	2	3	4	5	
0	170	170	170	170	170	170
60	170	169	168	168	170	169
110	169	168	165	167	169	167,6
160	165	167	164	164	167	165,4
210	155	165	160	164	161	161
260	160	161	160	163	160	160,8
310	155	160	158	162	160	159

Fuente: Elaboración propia

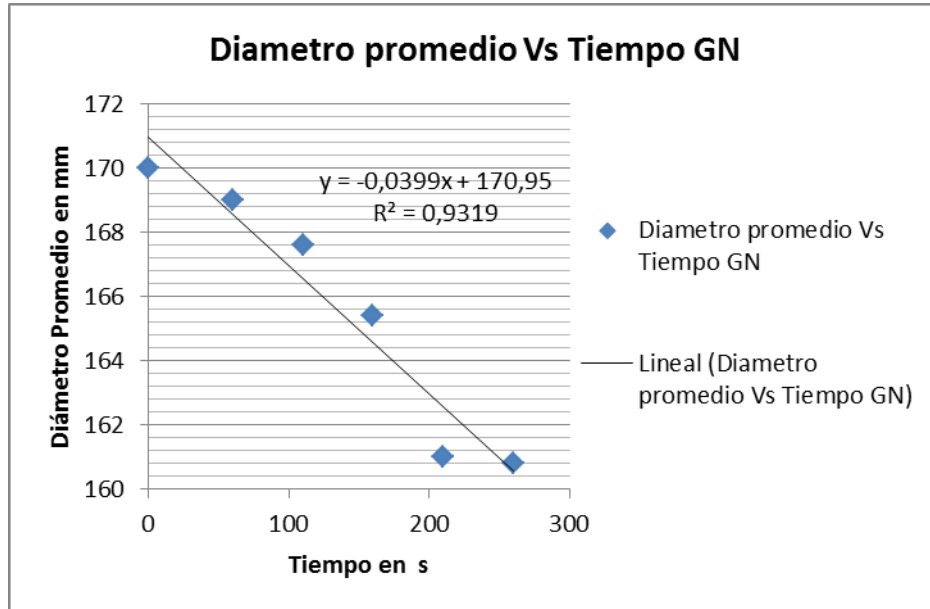
Los diámetros promedios se encuentran graficados en las Figuras 11 y 12 de aquí se puede observar que la contracción en el diámetro promedio es muy similar para ambos equipos; mostrando una discrepancia en el caso eléctrico debido posiblemente a que la geometría de la parrilla no abarca totalmente la geometría del producto; sin embargo, es un indicador geométrico fácil de estandarizar, si se define como constante; en promedio se podría decir que el porcentaje de contracción diametral de una arepa para considerarse asada es del 6% y se puede afirmar que: una arepa cruda, moldeada en molde número 17, mide 170 +/- 1 mm de diámetro y asada por ambos lados debe medir aproximadamente 160 +/- 1 mm.

Figura 11. Diámetro de la arepa referente al tiempo de asado en equipo a gas natural.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Diámetro de la arepa referente al tiempo de asado en equipo a eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

Queda sólo establecer 'en minutos' la diferencia -en tiempo- que tarda en los diferentes equipos para lograr esta dimensión; ejercicio que se realiza a continuación y que se registra en la **tabla 10**, tanto para el equipo a GN como para el eléctrico.

Se puede observar el comportamiento del tiempo por lado de asado del producto, en los equipos con diferente fuente de calentamiento; en el equipo a gas el lado 1 requiere de un tiempo más prolongado que en el lado 2; en este tiempo asignado inmediatamente se observan indicios de vapor para el lado uno y para el lado dos de inmediato se mide el diámetro de la arepa con una cinta métrica en mm, hasta lograr el diámetro de 160 +/- 1 mm. En el caso eléctrico, el procedimiento es el mismo pero la textura superficial de la arepa se ve afectada por la quema en algunos lugares para el lado 2; esto se debe a que las temperaturas en la resistencia eléctrica varía en la geometría del producto; además, el cubrimiento de la parrilla no se da en toda la geometría de la arepa lo que impide una contracción homogénea como se puede ver en la figura 15.

Tabla 10. Registros de tiempo que requieren las arepas para lograr el asado

Ítem		1	2	3	4	5	6	7	8
GN (t= min.)	Lado 1	3,53	2	2	2	2	2	2	2
	Lado 2	2,27	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Eléctrico (t= min.)	Lado 1	3,35	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Lado 2	2,3	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Fuente: Elaboración propia

De los resultados anteriores se observa que un tiempo total promedio para alcanzar el diámetro estimado es de 3,5 minutos para el GN y de 3 minutos para el equipo eléctrico.

El trabajo se realizó en una estufa domiciliaria comercial diseñada para funcionar tanto a gas como con resistencia eléctrica; la potencia nominal en el equipo a GN corresponde a 1.4 kW y de 1,1 kW en el equipo eléctrico.

Figura 13. Textura durante la prueba de cocción y equipos de medición utilizados



Textura



Medidas



Equipos



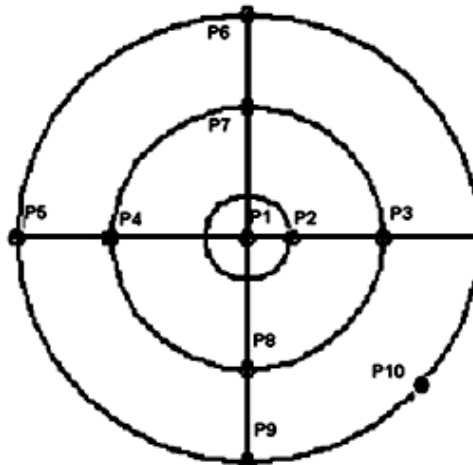
Equipos

Fuente: Elaboración propia

De la observación en la Figura 13 se concluye que para una misma contracción diametral, la presentación superficial del producto asado en el equipo eléctrico se concentra en una región que corresponde a un perfil de temperatura entregado por el equipo y que ésta corresponde a la geometría de resistencia eléctrica; a diferencia de la prueba a gas donde se ve un adecuado acabado superficial; en adelante se considera asada una arepa siempre que se dé la condición de contracción diametral.

Perfiles de temperatura. Para determinar el perfil de temperatura tradicional para el asado, se recurrió a los diferentes equipos del laboratorio de Ciencias Térmicas del ITM; se utilizaron las fuentes de calor y se midieron las temperaturas en los puntos señalados en la Figura 14. Los valores obtenidos para cada fuente de calor se presentan en la Tabla 11.

Figura 14. Puntos de toma de temperaturas superficiales de las diferentes fuentes de calor²⁴.



Fuente: Adaptación propia

Tabla 11. Distribución de temperaturas sobre la fuente de calentamiento en °C

ITEM	\bar{X}	S	CV%
Parrilla Eléctrica	354,4	131,54	37,12
Superficie Carbón	346,5	174,84	50,46
Placa GLP	379,1	87,969	23,2

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran los promedios de temperatura, la desviación estándar y el coeficiente de variación según el tipo de fuente de calor, se destaca el comportamiento del GLP dado que el coeficiente de variación es menor que los otros dos, indicando que la temperatura es más homogénea y de mayor valor promedio en dicha fuente. Estos perfiles se requieren para establecer las primeras simulaciones en el software ANSYS FLUENT, para observar el comportamiento térmico de las arepas en los diferentes equipos que serán estudiados y así obtener información importante para el diseño del prototipo.

²⁴ Tomado de ASTM. (2003), NTC. (2001)

4.3 PRUEBAS DE ASADO DE AREPAS EN EQUIPOS TRADICIONALES

Con el propósito de comparar los resultados del prototipo que se diseñe se han realizado unas pruebas en el proceso de asado en dos equipos tradicionalmente utilizados para tal fin, uno alimentado con GLP y el otro por resistencia eléctrica, los cuales fueron ubicados en el laboratorio de Ciencias Térmicas del ITM.

Características del equipo eléctrico evaluado

- Equipo marca HACEB, referencia cocineta EM-1, voltaje nominal 120 V, frecuencia nominal 60 Hz, potencia nominal 1.100 W.
- Voltaje medido 121.2 V; corriente medida 8,5 A; potencia calculada 1.0302 kw.

En la **tabla 12** se tiene registro de los valores promedios de las variables del producto obtenidos en las pruebas correspondientes al equipo eléctrico, en el proceso de asado de arepas con un tiempo de duración del proceso de 218 seg. A su vez en la tabla 14 se tienen la relación de las variables físicas estadísticas que se tienen presente para la medición, el peso en kilogramos promedio (peso kg) del producto, temperatura de entrada del producto (Ti) y la temperatura final del producto (Tf).

Tabla 12. Registro de los resultados promedios de temperatura y peso, obtenidos en las pruebas al equipo eléctrico en el proceso de asado de arepas.

ITEM	Ti Arepa °C	Tf Arepa °C	Ti sistema °C	Tf sistema °C	Peso i Arepa g	Peso f Arepa g
\bar{X}	19,8	84,1	350,3	411,9	167,5	140,3
S	1	13,69	13,52	46,8	9,16	2,44
AC%	5,05	16,27	3,85	11,18	5,46	1,74

Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 13** se registran los resultados calculados de la energía, con los datos obtenidos en las pruebas correspondientes al equipo eléctrico en el proceso de asado de arepas, estos se utilizan para determinar la eficiencia de cocción.

Tabla 13. Registro de los resultados promedios de energía, calculados con los datos obtenidos en las pruebas correspondientes al equipo eléctrico en el proceso de asado de arepas.

Energía consumida x la arepa kWh	Energía consumida x la parrilla kWh	Energía suministrada x el equipo kWh
0,009409	0,0007415	0,0623722

Fuente: Elaboración propia

Nota

- La energía consumida por la arepa es calculada teniendo presente la masa promedio entre las condiciones de peso inicial y peso final, el Cp de la masa es 3.396 kJ / kg°C
- Para el cálculo de la energía consumida por la parrilla, se utilizan la masa de la parrilla (0,0929 kg), Cp del acero 0.461 kJ/kg°C y las temperaturas final e inicial del sistema.
- Con los valores obtenidos de corriente y voltaje medido, las energías de la tabla 13, peso inicial y tiempo de proceso, precio del kWh industrial de \$394,19 (noviembre de 2011) y energía suministrada por el equipo y peso inicial por energía suministrada; se calculan los indicadores registrados en la tabla 14.

Tabla 14. Registro de los resultados de indicadores calculados con los datos obtenidos en las pruebas al equipo eléctrico en el proceso de asado de arepas.

Potencia Kw	Eficiencia de cocción%	Capacidad de cocción kg/h	Costo del combustible por unidad \$	Capacidad por consumo de combustible kg/kWh
1,0302	16,3	2,76	24,59	2.68

Fuente: Elaboración propia

Equipo a GLP

Características del equipo a GLP evaluado

- Equipo marca HACEB, referencia cocineta GM-2 STD TRAD GP GRIS, diseñado para operar con gas LP, presión de suministro 29+6/-4 mbar. Potencia reducida del quemador 4,14 MJ/h (1,15 kW), potencia nominal 5,94 MJ/h (1,65 kW).

Registros obtenidos en las pruebas

- Consumo en 8 minutos y 57 segundos se consume 0,01 m³ de GLP.
- PCI = poder calorífico superior del GLP 12,64 kWh/kg
- ρ = densidad del GLP 1,58 kg/ m³

En las tablas 15 y 16 se tiene un registro de los resultados promedios de las variables involucradas en las pruebas correspondientes al proceso de asado de arepas, en el equipo que utiliza como combustible GLP; el volumen de GLP consumido es de 0,004395 m³ y el tiempo de proceso corresponde a 236 seg.

A su vez, en la tabla 16 se tienen la relación de las variables físicas estadísticas que se tienen presentes para la medición, el peso promedio en kilogramos (peso kg) del producto, temperatura inicial (Ti) y la temperatura final (Tf) tanto del producto como del sistema.

Tabla 15. Registro de los resultados promedios de temperatura y peso obtenidos en las pruebas correspondientes al proceso de asado de arepas en equipo que utiliza como combustible GLP.

ITEM	Ti Arepa °C	Tf Arepa °C	Ti sistema °C	Tf sistema °C	Peso i Arepa (g)	Peso f Arepa (g)
\bar{X}	19,2	79,8	398,4	416,1	171,1	130,2
S	0,063	9,49	5,53	13,99	1,21	4,44
CV%	0,33	11,89	1,39	3,36	0,7	3,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Registro de los resultados promedios de energía calculados con datos de las pruebas correspondientes al proceso de asado de arepas en equipo que utiliza como combustible GLP.

ENERGÍA CONSUMIDA		
X la arepa kWh	X la parrilla kWh	X el equipo kWh
0,008679	0,00041	0,08680

Fuente: Elaboración propia

Nota

- La energía consumida por la arepa es calculada teniendo presente la masa promedio entre las condiciones de peso inicial y peso final, el Cp de la masa es 3.396 kJ / kg°C
- Para el cálculo de la energía consumida por la parrilla, se utilizan la masa de la parrilla (0,1784 kg), Cp del acero 0.461 kJ/kg°C y las temperaturas final e inicial del sistema.
- Con los valores obtenidos de volumen consumido y tiempo de proceso, las energías de la tabla 16, peso inicial y tiempo de proceso, precio del combustible 2755.77 \$/kg (noviembre de 2011) y volumen de gas consumido por el equipo, peso inicial por energía suministrada, se calculan los indicadores registrados en la tabla 17.

Tabla 17. Registro de los resultados de indicadores, calculados con los datos obtenidos en las pruebas correspondientes al equipo a GLP, en el proceso de asado de arepas.

Potencia kW	Eficiencia de cocción%	Capacidad de cocción kg/h	Costo del combustible por unidad \$	Capacidad por consumo de combustible kg/m³
1,32	10,46	2,61	19,13	1,976

Fuente: Elaboración propia

4.4 SIMULACIÓN CFD

Para la simulación de los fenómenos térmicos predominantes en la producción de arepas se requiere de antemano el valor de algunas propiedades físicas del material a calentar y de los combustibles usados en este proceso. En la tabla 18 se presentan algunas de las propiedades térmicas de la masa de arepas o similares, al igual que para combustibles utilizados en el proceso de asado de arepas y que se utilizaron para la simulación.

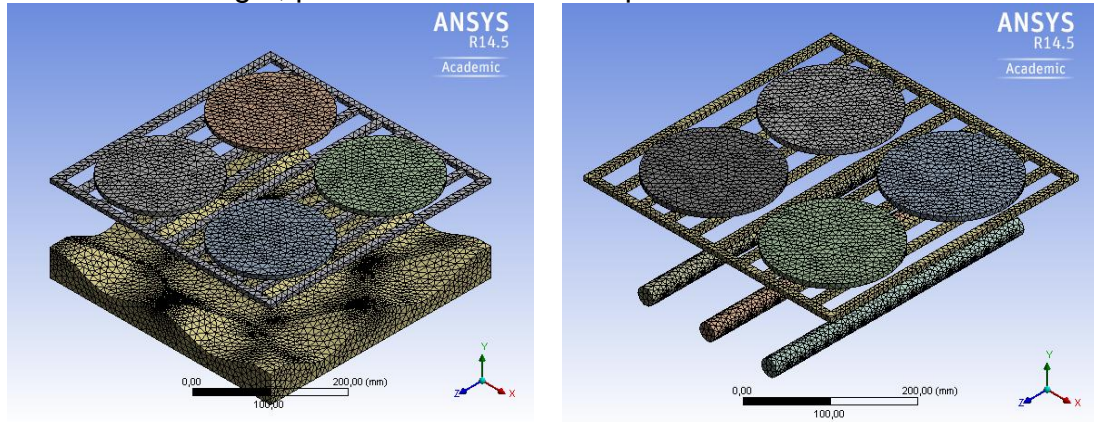
Tabla 18. Propiedades térmicas de la arepa y combustibles

Propiedad	Masa arepa	Carbón leña	Carbon leña 176°F	Carbon leña 172°F
Cp [Kj/Kg °C]	3,396	0,836	0,847	0,825
Cond. Térmica [W/m °C]	0,555	0.47	0,043	0,051
Densidad [kg/m³]	1081,39	30 a 50	36.18	45.23

Tomado de: Coral (2010), Rodríguez (2007).

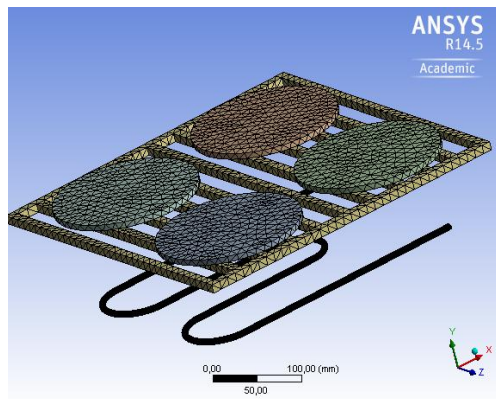
Utilizando el software ANSYS en versión 14.5, módulo DM (*Design- Modeler*), se definen las geometrías que ocupan los diferentes cuerpos, aclarando si son fluidos o sólidos lo que permitirá el buen desempeño de las condiciones del mallado. En la Figura 15 se muestra la representación del mallado fundamentalmente tetraédrico, de cada una de las geometrías realizadas para cada tipo de combustible, utilizando el módulo Meshing de ANSYS 13.0.

Figura 15. Mallado correspondiente a las geometrías seleccionadas, de acuerdo a la fuente de energía, para la evaluación computacional.



Lecho de carbón de leña

Flautas a gas



Resistencia eléctrica

Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 19** se muestran las condiciones y exigencias de cada uno de los mallados para lograr un mejor desempeño del equipo y mayor confiabilidad de los resultados que se obtengan del módulo de Fluent.

Tabla 19, condiciones del mallado de cada uno de los arreglos según fuente de energía.

Arreglo GLP					
Número		Skewnes		Aspect Ratio	
Nodos	Elementos	Min	Max	Min	Max
282523	1636056	3,556 e ⁻⁰⁶	0,8495	1,158	12,029
Arreglo Eléctrico					
276243	1624808	7,08 e ⁻⁰⁶	0,849	1,158	13,87
Arreglo a carbón de leña					
72432	407697	6,588 e ⁻⁰⁶	0,8742	1,167	12,93

Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los procesos de cocción expuestos y de acuerdo al mallado que se utiliza según el tipo de combustible; se ha simulado el comportamiento de los fenómenos térmicos activando los modelos de energía K-épsilon estándar para viscosidad de flujos turbulentos, ordenadas discretas para la radiación y en el caso del proceso de cocción con gas se simuló el fenómeno de combustión activando el modelo *Finite Rate / Eddy Disipation* con un mecanismo de reacción metano-aire de dos pasos. Todas las ecuaciones de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento por convección se solucionaron empleando un esquema Upwind de segundo orden²⁵.

Estos modelos se han seleccionado entre los existentes debido a su aplicación más simple y facilidad de manejo para la complejidad de las geometrías en 3-D y el modelado los equipos industriales; a su vez permiten simular con precisión la transferencia de la radiación de calor a las regiones específicas de un sistema, además de la eficiencia computacional y la precisión con una combinación de simplicidad y fiabilidad, estos modelos permiten a Fluent simplificar los cálculos para la obtención de resultados. (ANSYS FLUENT. Inc 2009).

Para los casos de lecho de carbón de leña y resistencia eléctrica se propone inicialmente un número de 1.000 iteraciones, obteniendo una estabilización de las curvas correspondientes a los modelos activos aproximadamente a las 600 iteraciones.

En las **tablas 20 y 21** se describen las condiciones requeridas por Fluent para las simulaciones en cada uno de los arreglos a evaluar, teniendo presente el valor de temperatura promedio para la fuente de carbón en todo el lecho, que sería la condición más favorable para el proceso de asado de arepas.

Tabla 20. Condiciones para la simulación en Fluent del arreglo que funciona con carbón de leña.

Modelos en Fluent	Materiales	Boundary condition	Solution métodos Rata de disipación turbulencia
Energía, k-epsilon (2eqn), OD.	Aire, Arepa, carbón leña, acero.	Temperatura de la pared de carbón 620 °K	Second order upwind

Fuente: Elaboración propia

²⁵ Herrera, 2009, *et al*

Tabla 21. Indicaciones para la simulación en Fluent del arreglo que funciona con GLP.

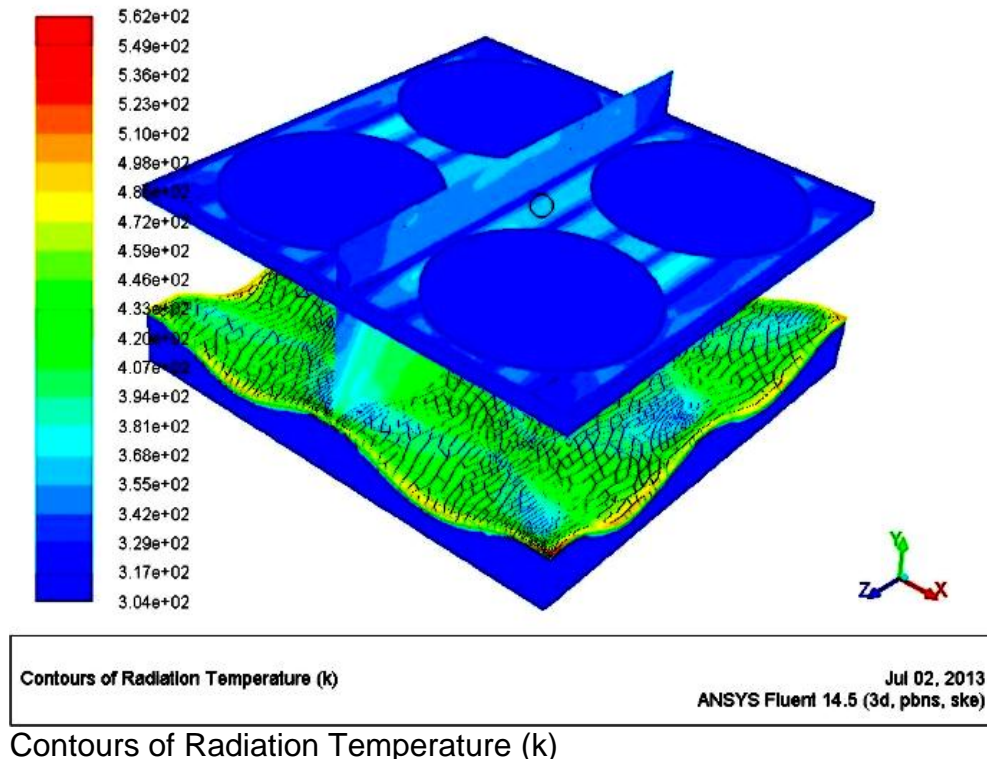
Modelos en Fluent	Energía, k-epsilon (2eqn), OD, species transport. Finiterate /Eddy disipation, propano-aire dos pasos
Materiales	Aire, Arepa, acero; propano- aire dos pasos
Boundary condition	Temperatura del aire de entrada 2.500 ⁰ K para iniciar las reacciones del sistema
Solution métodos Rata de disipación turbulencia	Second order upwind
flujos máscicos por cada flauta	Aire: 0.00206 kg/s; Φ_h . 1 m; O ₂ . 0.232 GLP: 3.33e-05; Φ_h . 0.024 m; C ₃ H ₈ . fracción máscica 1
Pressure outlet por cada flauta	Especies. 0.2100766 fracción molar; Φ_h . 0.4m

Fuente: Elaboración propia

4.5 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

4.5.1 Carbón de leña. En la **Figura 16** se observa el lecho de carbón con una distribución homogénea de temperatura en la superficie, como se define inicialmente; esta condición es difícil mantener en el tiempo pero es ideal pensar que mediante una placa radiante se pueda mantener. En el plano vertical trazado por el centro se obtiene una distribución del calor y temperaturas constantes y homogéneas, lo que induce a pensar que la distancia -en este caso- entre la fuente y el producto corresponde a una adecuada selección. En el plano horizontal medio no se observan variaciones en las condiciones de temperatura y flujo de calor, esto indica que si se pudiese mantener en el tiempo de proceso este comportamiento de la fuente de calor se tendrían muy buenas condiciones térmicas para el asado del producto. Las huellas que se ven corresponden al grosor de la parrilla, esto permite pensar en disminuir el espesor de la sección transversal de los elementos que la componen para un mejor aprovechamiento energético directamente sobre el producto; este tipo de arreglos muestran los espacios libres por los cuales se permite el paso de calor que se desperdicia en el proceso, lo ideal es focalizar al producto todo el flujo.

Figura 16. Comportamiento de la radiación y temperatura en la simulación, con un equipo que utiliza como fuente de calor un lecho de carbón de leña.



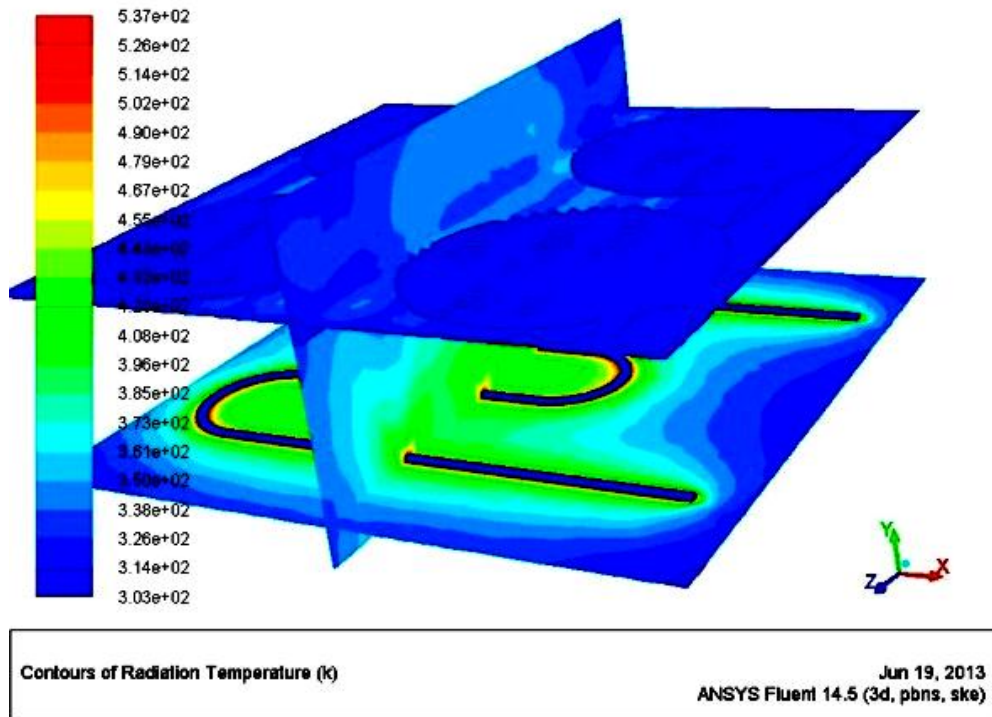
Contours of Radiation Temperature (k)

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Resistencia eléctrica. En la **Figura 17** se observa el comportamiento del modelo construido con resistencia eléctrica. Existe una distribución homogénea de la temperatura en el plano horizontal, trazado por el centro de la resistencia - similar a la anterior-, debido a la geometría, forma y temperatura asignada se obtiene una distribución del calor y temperaturas constantes y homogéneas suficientes para cubrir la posición del arreglo geométrico de las arepas. A diferencia del caso anterior esta condición es fácil de mantener en el tiempo.

En todo el plano vertical se obtiene una constante del comportamiento de la temperatura y de flujo de calor, el espaciamiento entre la distancia y la fuente de calor, igual que en el caso anterior, parece ser el adecuado, se observa el flujo de calor al interior de la arepa debido a un plano ubicado en dicha posición; el comportamiento es bastante bueno para el proceso, ya que cubre en un alto porcentaje del producto, sólo en las superficies de contacto con la parrilla se nota una variación de la temperatura y el flujo de calor; esto propone el diseño de parrillas de una mínima área de contacto con el producto similar al caso anterior.

Figura 17. Comportamiento de la radiación y temperatura en la simulación, con un equipo que utiliza como fuente de calor una resistencia eléctrica comercial.



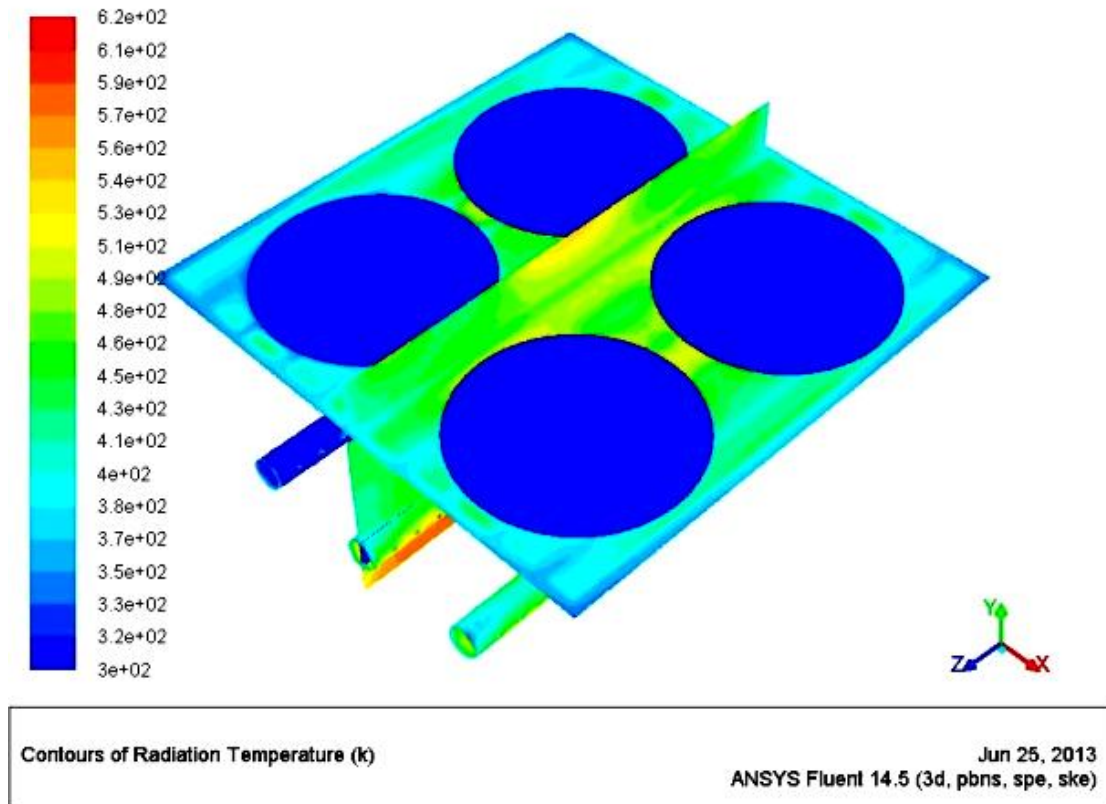
Contours of Radiation Temperature (k)

Fuente: Elaboración propia

Este tipo de arreglos muestran los espacios libres por los cuales se permite el paso de calor que se desperdicia en el proceso; lo ideal es focalizar todo el flujo al producto.

4.5.3 Quemadores flautas de gas. En la **Figura 18** se destaca el comportamiento de la temperatura y el flujo de calor muestran una desventaja significativa entre el gas como combustible utilizado en el proceso de asado de arepas y las otras dos fuentes de calor; la distancia en el plano vertical del producto -similar a los anteriores- parece ser la adecuada pero las condiciones en el plano horizontal sí muestran una concentración del flujo de calor y la temperatura hacia el centro del arreglo; comportamiento comprensible desde el punto de vista del flujo de gases de combustión buscando la menor oposición y concentrando la trayectoria hacia este; la distribución de calor desde el centro del arreglo hacia el exterior se ve reflejada en un producto no uniforme que requiere de un adecuado manejo para evitar inconformidades.

Figura 18. Comportamiento de la radiación y temperatura, en la simulación, con un equipo que utiliza como fuente de calor un conjunto de tres flautas quemadoras de GLP.



Contours of Radiation Temperature (k)

Fuente: Elaboración propia

4.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS MALLAS

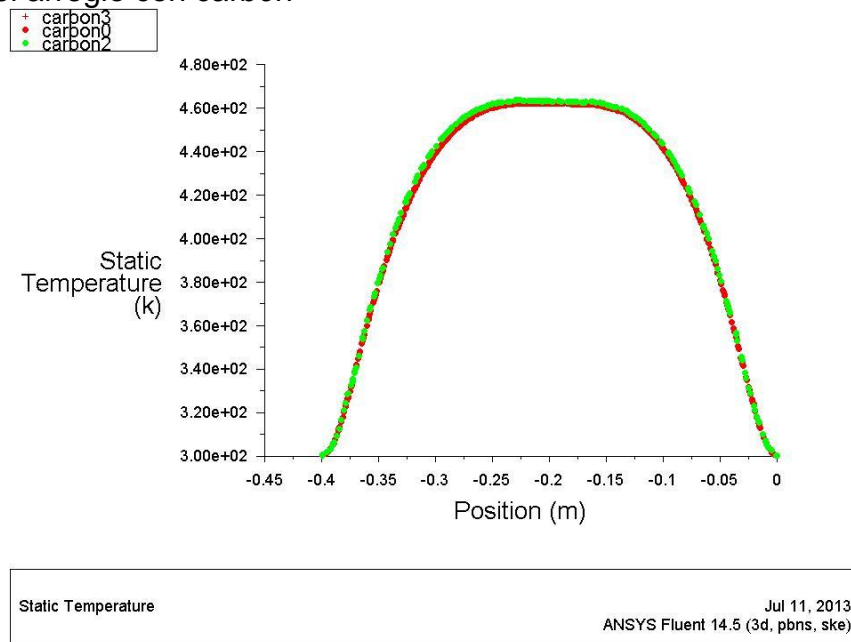
Para el análisis de sensibilidad de las mallas en los arreglos con diferente fuente de calentamiento; se procedió de la siguiente manera:

En el software Ansys Fluent y teniendo la geometría definida para cada uno de los casos con diferente fuente energética, se construyó una línea diagonal que pasara por todo el centro del arreglo; paso seguido se definieron los tres duplicados denominados como (fuente de calor 0, 2 y 3,) se asigna el volumen al cual se le realizara el refinamiento de malla y el respectivo valor que le corresponde, asignándole el valor de 2 divisiones a la simulación 2, 3 divisiones a la simulación

3 y ninguna a la 0; hay que aclarar que este procedimiento se realiza directamente en el módulo de Fluent.

En la **figura 19**. Se tiene el resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de las mallas 2 y 3 y se compara con 0; además se tiene el contorno de temperatura en K, sobre la línea diagonal- central trazada en el arreglo; y el eje horizontal marca la longitud del arreglo, que tiene como fuente de calor el carbón de leña; la diferencia más significativa se presenta en el rango -0.35 a -0.25 y el máximo valor de discrepancia no supera el 0.75% según valores entregados por Fluent.

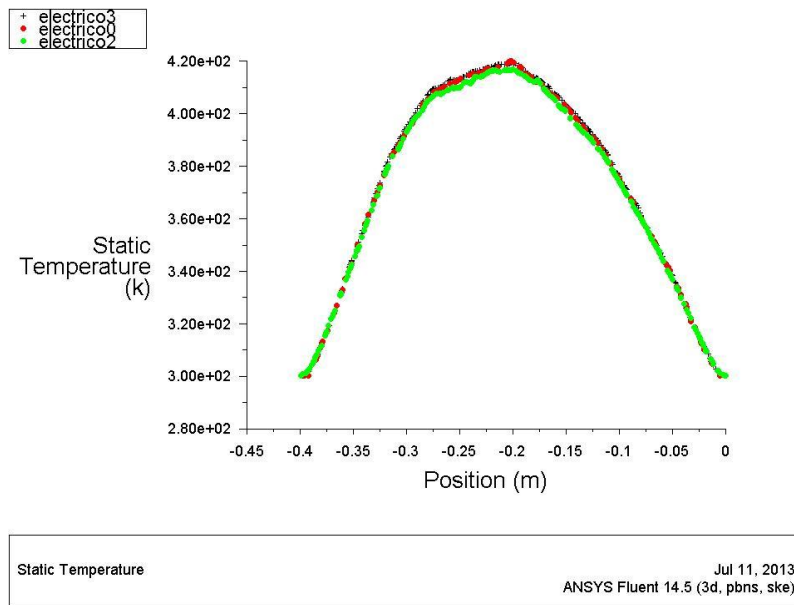
Figura 19. Resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de las mallas en el arreglo con carbón



Fuente de elaboración propia

En la **figura 20**. Se tiene el resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de la malla 2 y 3 comparada con 0, del contorno de temperatura en K, sobre la línea diagonal- central, trazada en el arreglo y el eje horizontal marca la longitud del arreglo, que tiene como fuente de calor resistencia eléctrica; la diferencia más significativa se presenta en el rango -0.3 a -0.2 y el máximo valor de discrepancia no supera el 0.6% según valores entregados por Fluent.

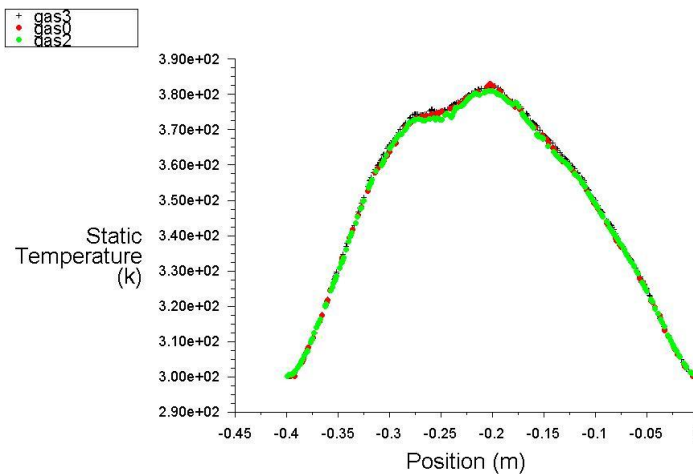
Figura 20. Resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de las mallas en el arreglo con resistencia eléctrica.



Fuente de elaboración propia

En la **figura 21**. Se tiene el resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de la malla 2 y 3 y comparada con 0, del contorno de temperatura en K, sobre la línea diagonal- central, trazada en el arreglo y el eje horizontal marca la longitud del arreglo, que tiene como fuente de calor gas GLP; la diferencia más significativa se presenta en el rango -0.3 a -0.2 y el máximo valor de discrepancia no supera el 0.6% según valores entregados por Fluent.

Figura 21. Resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de las mallas en el arreglo con GLP.



Static Temperature Jul 12, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, ske)

Fuente de elaboración propia

De los resultados obtenidos de la comparación de mallas en los tres arreglos se concluye que las gráficas de las líneas 2 y 3 prácticamente no se ven modificadas comparadas con la 0; esto demuestra que los resultados obtenidos con la malla elegida para cada arreglo corresponde a una buena elección y que sus resultados son confiables.

4.7 PROCESO DE DISEÑO DEL HORNO

4.7.1 Criterios del Diseño experimental. Una vez construido el prototipo se realiza una serie de actividades de puesta a punto para evaluar el funcionamiento de los componentes y acoplar los equipos requeridos.

Ya que el diseño experimental es una prueba donde se cambian controladamente algunas condiciones de operación de un sistema o proceso, con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o más variables y que para el caso de nuestro prototipo todas las variables implicadas, tanto las condiciones de entrada, salida e interiores, quedan estandarizadas en valores fijos, entonces nos referimos para la realización de las pruebas experimentales en el procedimiento guiado por la norma ASTM F1521-96 “*Standard Test methods for performance of Range tops*”; el objetivo es examinar la operación y el rendimiento de cada tipo de equipo, tanto a gas como eléctrico, en la preparación de alimentos con una confiabilidad de +/- 10% bajo condiciones controladas dado que el propósito de este estudio es comparar eficiencias de cocción; en este caso de arepas se han seguido las recomendaciones de la norma y se han tenido presentes en la fabricación del prototipo para mantener el nivel de confiabilidad de los resultados.

Fundamentalmente, la norma es aplicable para determinar la eficiencia, el consumo energético, el tiempo y la uniformidad de temperaturas para equipos con fuente de calentamiento a gas y eléctrico; por tal motivo se omite en este estudio la comparación con el equipo a carbón de leña.

En general, los equipos se ubicaron en el laboratorio de Ciencias Térmicas del ITM y fueron monitoreados a su capacidad mayor, las medidas realizadas 30 minutos después de estabilizados a su potencia definida con el propósito de obtener la uniformidad de la temperatura en cada equipo, se utilizaron las parrillas comerciales y se ubicaron los puntos donde se debe medir la temperatura, tanto para la eficiencia de cocción como para la capacidad de producción, se utilizaron los datos de tres pruebas en los diferentes equipos evaluados, como lo propone la norma.

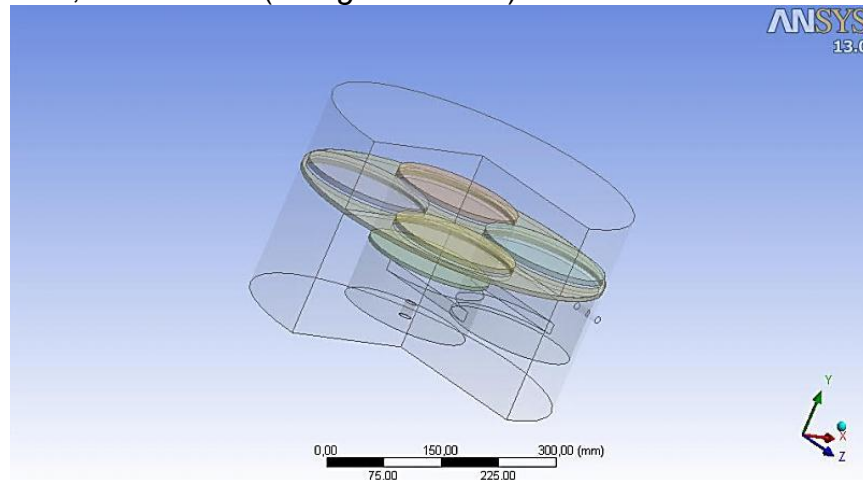
4.7.2 Criterios de diseño del prototipo. De la necesidad de un equipo que funcione con placa radiante infrarroja que aumente la eficiencia energética en el proceso de asado de arepas tradicionales antioqueñas con un parámetro de potencia específica de $30,83 \text{ kW/m}^2$ y capacidad de procesamiento de $1,63 \text{ kg/h}$, ya que la placa debe tener aproximadamente un diámetro similar al de la arepa (170 mm) y el quemador debe ser atmosférico, de uso domiciliario, teniendo presente los requerimientos de temperatura entre 100°C y 200°C para un adecuado proceso de asado y partiendo de que una arepa formada en el molde 17 se considera asada cuando logra un diámetro de 160 mm; por consiguiente se considera que el prototipo debe tener las siguientes condiciones:

Las dimensiones se seleccionaron de las pruebas en los equipos realizadas en las simulaciones para arreglos de 4 arepas diámetro 170 mm; las partes móviles deben simular un proceso continuo de alimentación manual y que evite tiempos excesivos de operación. Referente al combustible se utilizará GLP comercializado para Colombia con un exceso de aire entre 10 y 15%; así mismo se deben aprovechar los productos de combustión que deberán estar aislados del producto, buscando un movimiento contrario a la arepa para mejorar la transferencia de calor. En general, se debe garantizar un adecuado aislamiento en todas las superficies calientes, evitar al máximo que el calor salga del equipo teniendo presente que se deben ubicar accesos para la medida de las variables requeridas; seleccionar quemadores y partes de uso común y de fácil consecución en el mercado; el prototipo debe ser diseñado con mínima cantidad de elementos de ensamble requeridos y en caso de utilizarlos, preferiblemente iguales en geometría, forma y tamaño, que las partes sean de acceso rápido y cómodo para su operación, limpieza e inspección.

En el anexo A se explica y describe del proceso de diseño que permitió obtener el prototipo a evaluar.

El horno que se muestra en la **Figura 22** es un modelo tridimensional (3D) para la simulación en estado estacionario y fue creado para dar claridad de la metodología a seguir de este estudio.

Figura 22. Diseño del prototipo al que se ha llegado utilizando el software ANSYS en versión 14.5; módulo DM (*Design- Modeler*).



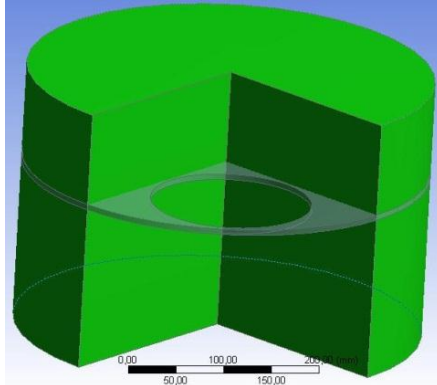
Fuente: Elaboración propia

Manteniendo los parámetros geométricos de los arreglos anteriores, se buscan las alternativas que permitan aprovechar las ventajas encontradas en los casos que utilizan carbón de leña y la resistencia eléctrica, para semejar dichas condiciones en un arreglo que funcione a gas; es así como se pretende mejorar el comportamiento térmico utilizando las ventajas de la simulación CFD.

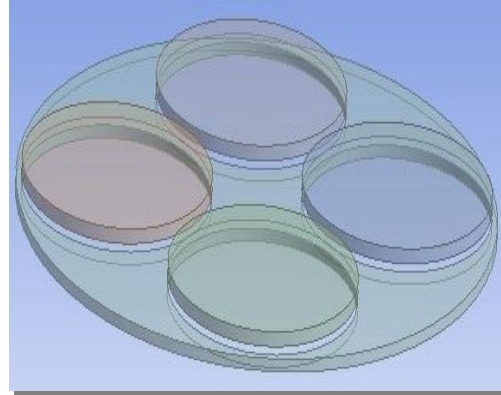
La propuesta entonces debe mantener una superficie radiante lo más homogénea posible focalizada sobre el producto, un aprovechamiento del calor de los gases de combustión precalentando la arepa, un cerramiento que logre mantener una temperatura constante e impida las pérdidas de calor al medio, además de facilitar la operación del equipo.

En la **Figura 23**. Se tiene un arreglo que consta de dos cuerpos externos aislados que conforman las carcasas que garantizan el cerramiento (**23 a.**), una parrilla móvil circular con cuatro puestos para albergar el producto (**23 b.**), un conducto para direccionar humos (**23 c.**), una placa radiante de carburo de silicio en forma circular y de igual dimensión que la arepa focalizada hacia el producto (**23 d.**), tres arepas en proceso y una en espera (**23 d.**).

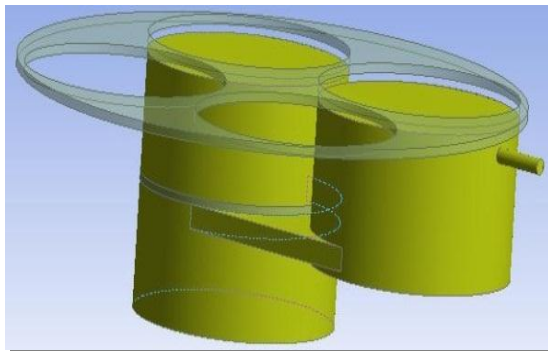
Figura 23. Partes que componen el diseño a evaluar: carcasa y parrilla



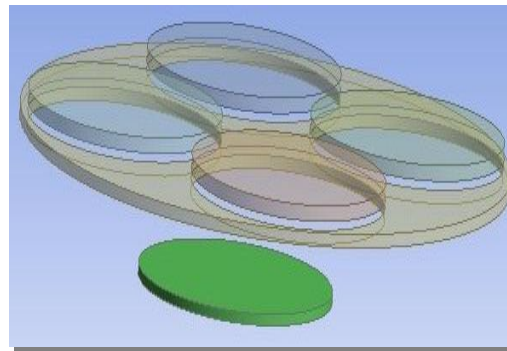
25 a. Carcasas



25 b. Parrilla



25c Ducto de humos



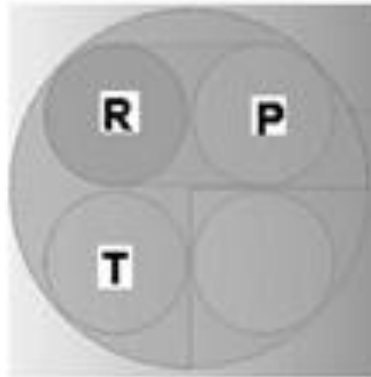
25d Placa y arepas

Fuente: Elaboración propia

4.8 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA SIMULACIÓN CFD

Modelado. Para tener buenos resultados en una simulación CFD es recomendado construir un modelo que represente las condiciones que se pretenden valorar, acorde con las exigencias del estudio y minimizando en lo posible las condiciones que generen altos costos computacionales. El modelo que se propone se muestra en la **Figura 24** y está compuesto de las tres posiciones principales a la que será sometido el producto, **P** es una zona de precalentamiento que aprovecha el calor de los productos de la combustión, además del calor confinado en el entorno. **R** corresponde a una zona radiante focalizada al producto, emitida por una placa de carburo de silicio que absorbe y emite la radiación de la llama. **T** es el espacio requerido para facilitar la transferencia de calor desde las paredes del producto hacia su interior.

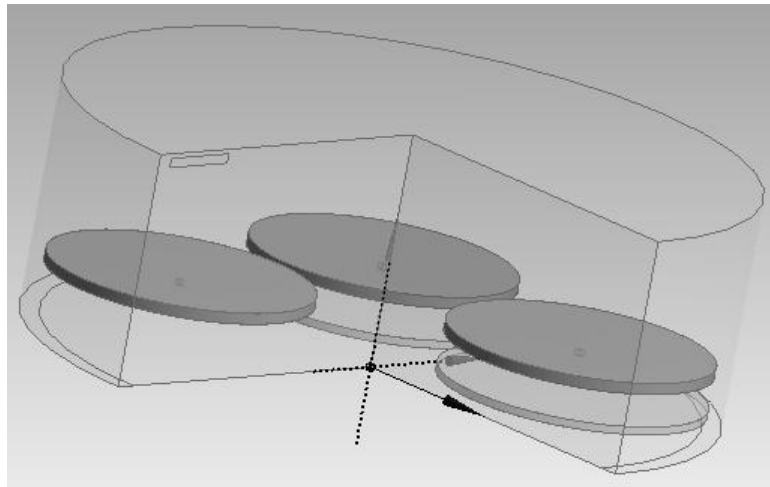
Figura 24. Descripción gráfica de las zonas que se compone el horno a simular.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 25** se propone una división entre las dos partes fundamentales del horno, arreglo donde se observan las tres arepas en posición acorde a cada una de las posiciones en que se divide el horno, para observar el comportamiento del producto al interior del horno y las posiciones de las placas radiante y precalentadora que serán utilizadas como falsos fondos en la simulación como lo propuesto por Hiteshkumar Mistry, 2011 *et al*, para facilitar el trabajo realizado por ANSYS FLUENT y los equipos de cómputo. Esta parte superior es una región de confinamiento del calor con unos perfiles de temperatura determinados para simular el comportamiento interno del horno, a su vez tiene una ranura inferior simulando el espacio que existe entre la parrilla y la carcasa; al igual que una rendija en la parte superior para facilitar la salida de vapor y el movimiento al interior del horno. Es de notar que el primer cuadrante del arreglo, que consiste en la posición cuarta de una arepa en espera y la parrilla móvil, ha sido eliminado para facilitar la simulación.

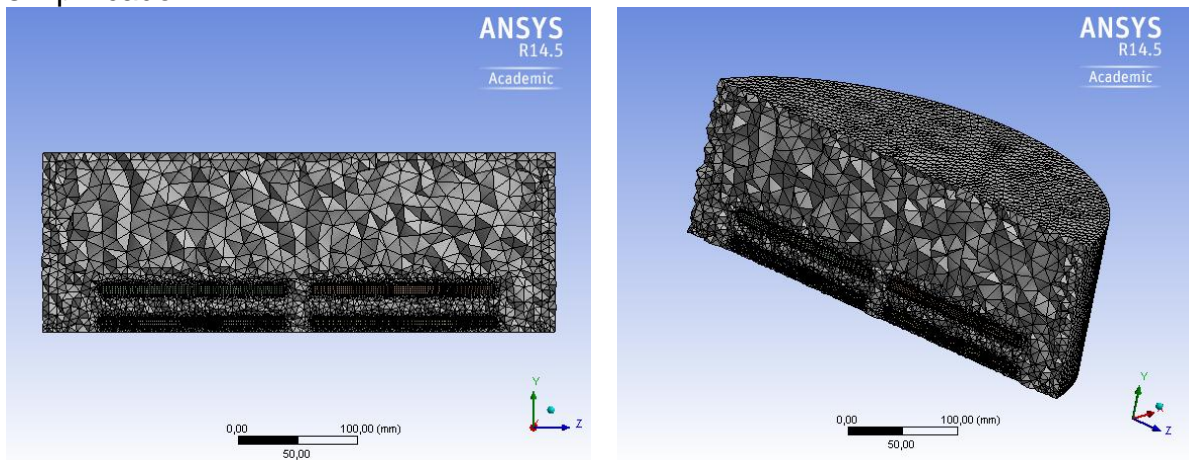
Figura 25. Arreglo simplificado que permite la modelación del horno y el producto con falso fondo.



Fuente: Elaboración propia.

Mallado. En la **Figura 26** se muestra la representación en corte (3D) del Mallado fundamentalmente tetraédrico, aquí se puede observar el interior del horno y las posiciones: a la izquierda la placa radiante y la arepa en posición, a la derecha se tiene la placa precalentadora y su respectiva arepa en posición; en la parte superior está la región de confinamiento del horno. La figura fue realizada utilizando el módulo Meshing de ANSYS FLUENT 14.5.

Figura 26. Mallado en corte correspondiente a la geometría interior del prototipo simplificado.



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 22 se presenta los datos más representativos del mallado para el prototipo con falso fondo y la malla con 2 divisiones.

Tabla 22. Datos del mallado en el Prototipo con falso fondo.

Prototipo con falso fondo					
Número		Skewnes		Aspect Ratio	
Nodos	Elementos	Min	Max	Min	Max
58624	285818	1,5059 e ⁻⁰⁶	0,8978	1,0344	11,763
Malla con 2 divisiones					
1006522	3812115	4,566 e ⁻⁰⁶	0,828	1,0063	10,886

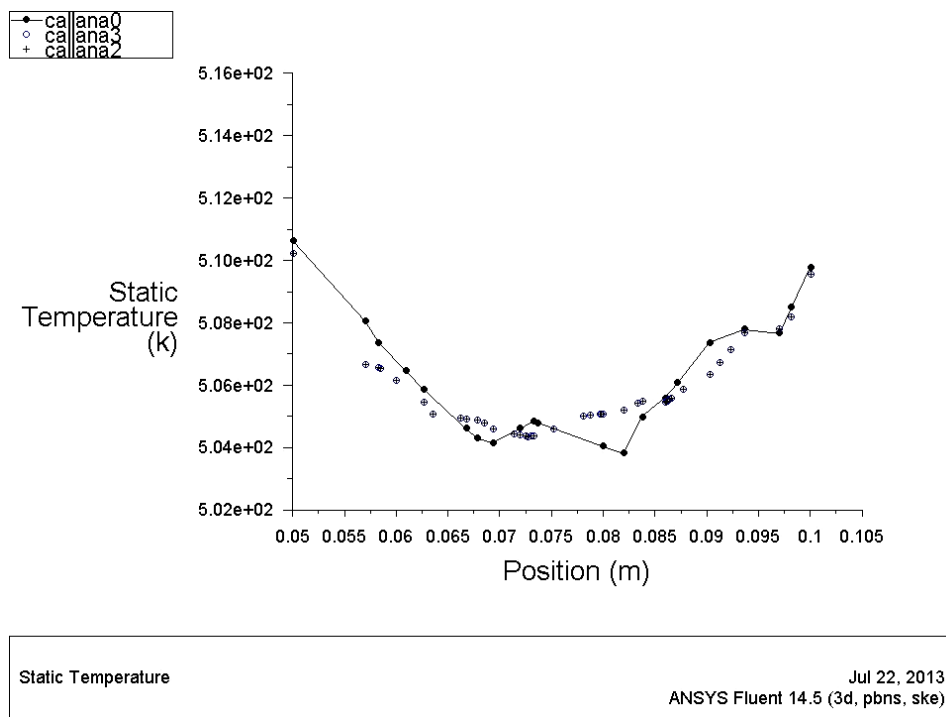
Fuente: Elaboración propia

Análisis de sensibilidad de las mallas en el prototipo con falso fondo. Para el análisis de sensibilidad de las mallas en el arreglo del prototipo con falso fondo; se procedió de la siguiente manera:

En el software Ansys Fluent y teniendo la geometría definida para el caso de falso fondo, se construyó una línea diagonal que pasara la parte superior al centro de la arepa en posición de precalentamiento; paso seguido se definieron los tres duplicados denominados como (callana0, 2 y 3,) se asigna el volumen al cual se le realizara el refinamiento de malla y el respectivo valor que le corresponde, asignándole el valor de 2 divisiones a la simulación 2 , 3 divisiones a la simulación 3 y ninguna a la 0;.hay que aclarar que este procedimiento se realiza directamente en el módulo de Fluent.

En la **figura 27**. Se tiene el resultado de las simulaciones dependiendo del refinamiento de las mallas 2 y 3 y se compara con 0; además se tiene el contorno de temperatura en K, sobre la línea diagonal- trazada por encima de la arepa en precalentamiento; el eje horizontal marca la longitud del arreglo en dicha zona.

Figura 27. Refinamiento de la malla para el prototipo de falso fondo



Fuente de elaboración propia

De los resultados obtenidos de la comparación de mallas en el arreglo se concluye que las gráficas de las líneas de refinamiento 2 y 3 son prácticamente iguales y al compararlas con la 0; difieren en un valor máximo al 0.56% esto demuestra que los resultados obtenidos con la malla 0 se encuentran dentro de lo permisible según Ansys Fluent y que sus resultados son confiables; pero existe una mejor homogeneidad con los datos de las mallas 2 y 3 lo que permite una mejor

apreciación del comportamiento de las variables térmicas involucradas en el proceso, así que se debe utilizar los datos obtenidos con la malla 2. Así se afecte el costo computacional.

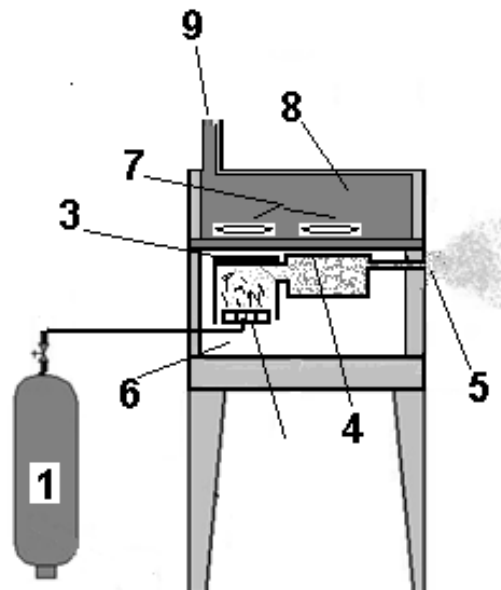
4.9 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El **esquema de funcionamiento** consta de las siguientes partes:

- 1 Tanque de suministro de GLP para Colombia 40 lbs.
- 2 Quemador atmosférico de premezcla
- 3 Placa radiante de carburo de silicio
- 4 Placa de acero, parte del ducto de humos
- 5 Salida de humos
- 6 Aire secundario
- 7 Arepas en proceso
- 8 Cámara del horno
- 9 Salida de vapor.

El prototipo a escala que se propone desarrollar y evaluar en el laboratorio corresponde a los esquemas de las **Figuras 28a y 28b**, éste brindará herramientas para adoptarlas y adaptarlas a nivel de MIPYMES.

Figura 28a. Esquema de funcionamiento del prototipo.

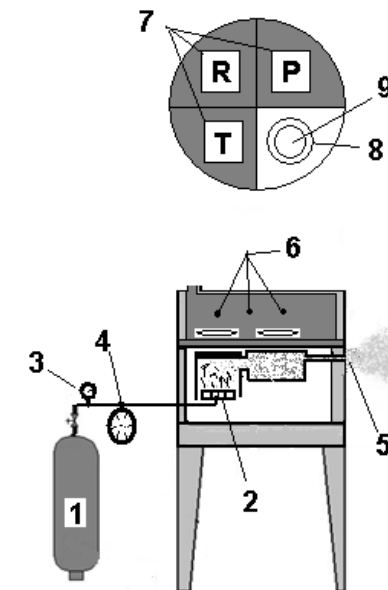


Fuente: Elaboración propia

Descripción del **sistema de evaluación del horno**. A continuación se presenta el esquema con los componentes que debe tener el prototipo para el control de las variables térmicas que se deben controlar para un adecuado funcionamiento del equipo y permitir el acceso de los instrumentos requeridos para una adecuada medición.

- 1 Tanque de GLP para Colombia 40 lbs.,
- 2 Aire secundario,
- 3 Medidor de presión,
- 4 Medidor de flujo de combustible,
- 5 Salida de humos,
- 6 Ubicación de las termocupas,
- 7 Mirillas de las Zonas del horno,
- 8 Condiciones de entrada del producto,
- 9 Condiciones de salida del producto.

Figura 28b. Esquema de evaluaciones del sistema del prototipo.



Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 23** se tiene el listado de variables térmicas a tener presente en las pruebas de medición con el fin de garantizar el cálculo de la eficiencia térmica del equipo y compararlas con los datos obtenidos en los equipos eléctricos y a GLP tradicionales y para garantizar una mayor eficiencia energética.

Tabla 23. Listado de variables térmicas a tener presente en las pruebas de medición

NOMBRE	UNIDAD	EQUIPO
Temperatura de la geometría radiante	°C	Termómetro IR
Temperatura de la geometría precalentadora	°C	Termómetro IR
Diámetro de la arepa a la entrada	mm	Molde Número 17
Diámetro de la arepa a la salida	mm	Geometría del equipo
Peso del producto a la entrada	gr	Balanza
Peso del producto a la salida	gr	Balanza
Temperatura del aire de ambiente	°C	Termómetro IR
Temperatura del interior del horno	°C	Termómetro IR+ termocuplas
Temperatura de entrada del producto	°C	Termómetro IR
Temperatura de salida del producto	°C	Termómetro IR
Tiempo de proceso	min	Cronometro
Flujo de combustible	m ³	gasómetro
Gases de combustión		Analizador de gases

Fuente: Elaboración propia

4.10 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

En esta etapa se tiene presente que se requiere de puntos y espacios para pruebas y toma de medidas, así como algunas modificaciones del equipo que puedan mejorar su desempeño tales como: distancias entre el producto y la placa radiante, el quemador y la placa, la tapa superior con aberturas para medir la temperaturas al interior del horno, entre otros.

La estructura y forma de las partes fue fabricada en los diferentes talleres del ITM, con el apoyo del personal encargado de cada lugar y teniendo presente las normas de seguridad exigidas para el uso, disposición de elementos y residuos de materiales.

En la **Figura 29** se muestran algunos pasos del proceso de fabricación como: cilindrado en torno, soldadura, rolado y corte de lámina; ensamble de partes y prototipo terminado.

Figura 29. Recopilación gráfica de la fabricación del prototipo (fabricación de partes, ensamble y prototipo)



Fabricación de partes





Ensamble
Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADO Y ANÁLISIS

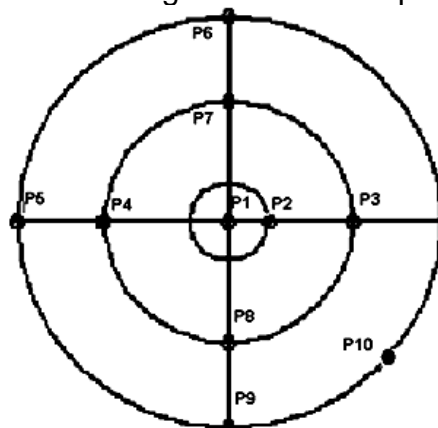
Después de realizar los ajustes pertinentes de acuerdo a los resultados obtenidos de la puesta punto y la fabricación del prototipo, se procede a determinar las temperaturas de las placas radiante y calentadora para las simulaciones del prototipo con falso fondo y así realizar la simulación en el software ANSIS FLUEN y determinar el comportamiento térmico del horno; a su vez se determina el impacto ambiental mediante el análisis de gases y se presentan los resultados obtenidos en la valoración de las condiciones del producto terminado, resultado de una encuesta sobre la aceptación del producto.

5.1 RESULTADO DE LAS MEDICIONES EN EL PROTOTIPO

Por medio de un termómetro IR y teniendo presente la geometría de las placas se procedió a medir las temperaturas superficiales, tanto de la placa radiante de carburo de silicio como de la placa de acero situadas sobre el quemador y ducto de humos respectivamente; con el propósito de obtener un perfil de temperatura promedio para utilizarlo de falso fondo, como el trabajo realizado por *Hiteshkumar Mistry*, 2011.

En la **Figura 30** se observan los puntos donde se realizan los registros para la placa radiante y en la **tabla 24** se tienen los resultados y el promedio de temperatura superficial de la placa radiante; esta será la temperatura que se asignará en la simulación del prototipo simplificado. Similar situación ocurre con la **Figura 31** y con la **tabla 25** para la placa de acero.

Figura 30. Sitios en los cuales se registraron las temperaturas en la placa radiante



Temperatura sobre la placa radiante

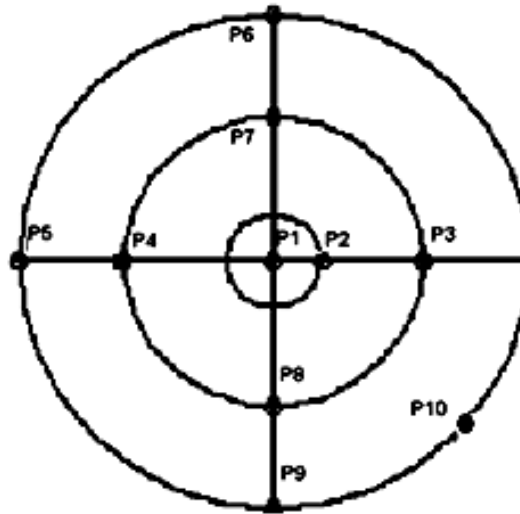
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Datos de temperaturas en °C obtenidos sobre la placa radiante

Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X	S	CV%
Temp.	602	564	615	626	536	528	543	519	538	462	553,3	45,1	8,15

Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Sitios en los cuales se registraron las temperaturas en la placa precalentadora



Temperatura sobre la placa precalentadora

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Datos de temperaturas en °C obtenidos sobre la placa precalentadora.

ítem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X.	S	CV%
temp.	282	308	197	275	243	239	233	256	243	193	246.9	33,94	13.75

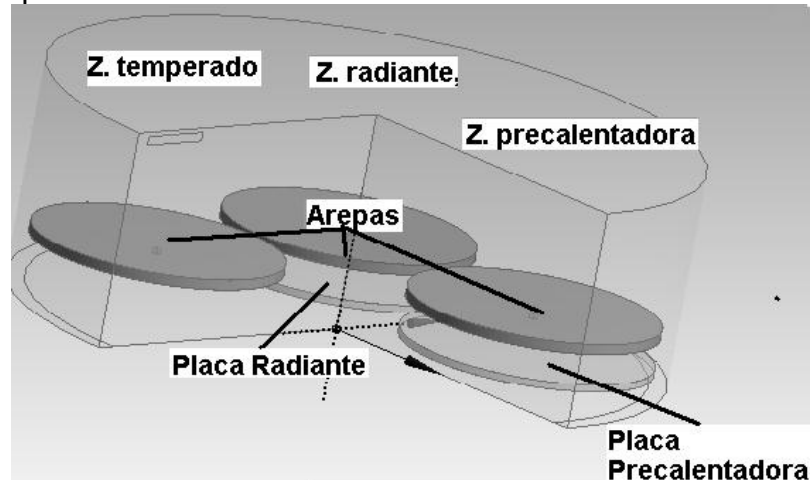
Fuente: Elaboración propia

5.2 REQUISITOS PARA SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO SIMPLIFICADO EN ANSYS FLUENT

Obtenidos los promedios de temperatura, tanto para la placa radiante como para la precalentadora, se procede a la simulación en el software **ANSYS FLUENT**. En la **Figura 32** se realiza una descripción del arreglo que corresponde al prototipo simplificado, falsos fondos (placa radiante y precalentadora) y la carga de tres

arepas internas que se sitúan en las diferentes zonas del horno (Z radiante, Z precalentadora y Z temperado).

Figura 32. Descripción del arreglo correspondiente al prototipo simplificado y sus componentes para la simulación en el software Fluent.



Fuente: Elaboración propia

La simulación CFD a utilizar es la misma que se manejó en los casos de resistencia eléctrica y carbón vistos anteriormente utilizando los perfiles de temperatura entregados por el prototipo 553.3. °C para la placa radiante y 246.9 °C para la placa precalentadora. A continuación en la **tabla 26**, se presentan las condiciones requeridas para la simulación del arreglo anterior y en la **tabla 27** se presentan los registros de las propiedades térmicas que requiere el software para la simulación; los valores para el aire y el acero se toman de la base de datos de Fluent.

Tabla 26. Condiciones para la simulación al interior del prototipo simplificado con placas de falso fondo.

Modelos en Fluent	Materiales	Condiciones de frontera	Métodos de solución
Energía, k-epsilon (2eqn), OD.	Aire, Arepa, Carburo de silicio, acero.	Temperatura de la placa carburo de silicio 826 ⁰ K. Placa de acero 519 ⁰ K.	Rata de disipación turbulencia Second order upwind

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Valores de las propiedades térmicas de los materiales requeridos para la simulación al interior del prototipo simplificado con placas de falso fondo en Fluent.

Ítem	Densidad kg/m ³	Cp. j/kg-K	Conductividad térmica w/m-K
Arepa	1081.39	3396	0.555
Carburo de silicio	322	1100	175

Fuente: Elaboración propia

5.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

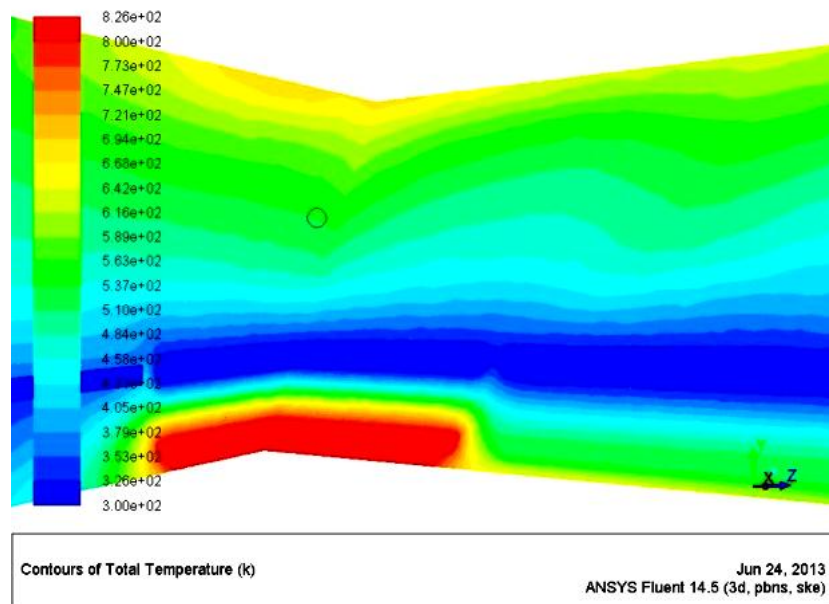
En la **tabla 28** se tiene un registro de la temperatura promedio en el interior de las cámaras del prototipo simplificado medidas con termocuplas tipo T, su valor promedio es de 520.6 °K (247,6°C); La **figura 33 a.** corresponde a la simulación en el software de la temperatura registrada en dos planos perpendiculares a la base del arreglo que cortan las arepas, y a las placas radiantes y su valor promedio registrado es de 550 °K (277°C). La **figura 33 b.** corresponde al registro termográfico realizado al prototipo, donde el valor promedio corresponde a 498 °K (225°C); la discrepancia entre el resultado obtenido por la simulación en el prototipo simplificado y el medido directamente en el prototipo se entiende ya que el prototipo presenta unas pérdidas por fugas y por partes, que no se contemplan en las condiciones de simulación; las diferencias entre el valor leído en la tomografía y el resultado medido por termocuplas, puede explicarse debido a la geometría circular del equipo ya que esta presenta una difracción de la imagen, lo que puede repercutir en la lectura.

Tabla 28. Registro de temperaturas promedio en °C, medidas en las tres zonas del prototipo, con termocuplas tipo K.

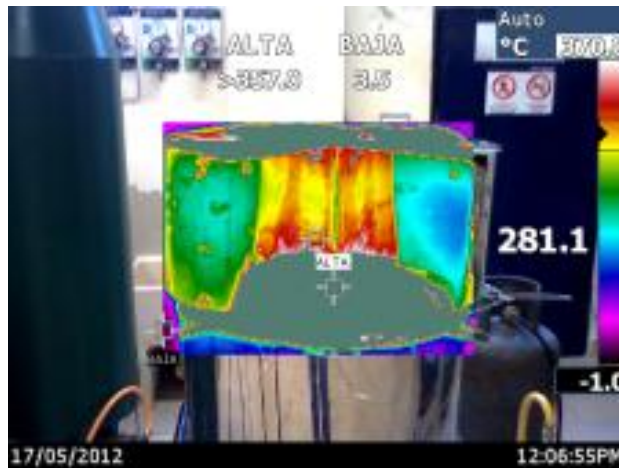
Zona Pre calentadora	Zona Radiante	Zona temperado
246	250	247

Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Imágenes de la simulación y termografía correspondientes a las temperaturas registradas.



33 a .contorno de temperatura total. (k)



33 b. termografía del prototipo

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 34** se puede observar el comportamiento del producto en las condiciones de proceso; en la figura **34 a.** se tiene un plano paralelo a la base del arreglo que pasa por la base de las tres arepas y permite ver la radiación incidente en el producto, en las tres posiciones. La figura **34 b.** corresponde al mismo plano, pero el perfil es de la temperatura y muestra su variación acorde con la posición del producto; con magnitudes apropiadas para el proceso según Meré Marcos, et

al (2009), que corresponde al rango de temperatura donde se presenta la gelatinización del almidón de maíz blanco, sin afectar desfavorablemente el producto. En la figura 34 c. se representa la termografía del producto como tal, aquí tenemos una temperatura promedio de 89°C en el exterior y en la superficie de la arepa, el equipo fue corregido con la emisividad de un cuerpo blanco; hay que aclarar que el tiempo de permanencia en cada zona del equipo es de 2 minutos y que los rangos de temperaturas obtenidos durante las pruebas en la superficie y en el exterior del equipo fueron en promedio 90°C con un termómetro IR. Estos valores son satisfactorios y dan cuenta de un acertado arreglo en el proceso de diseño.

Figura 34. Comportamiento de la arepa en el interior del arreglo simplificado y a la salida del horno.

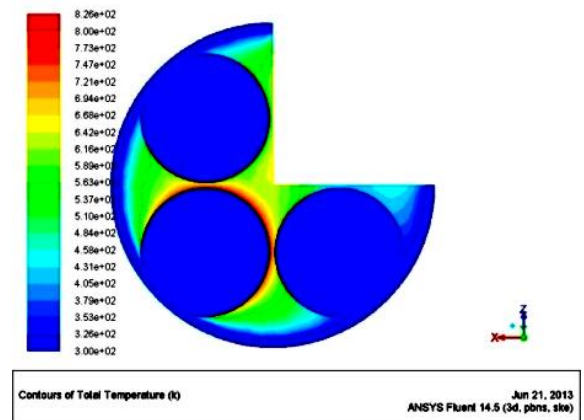
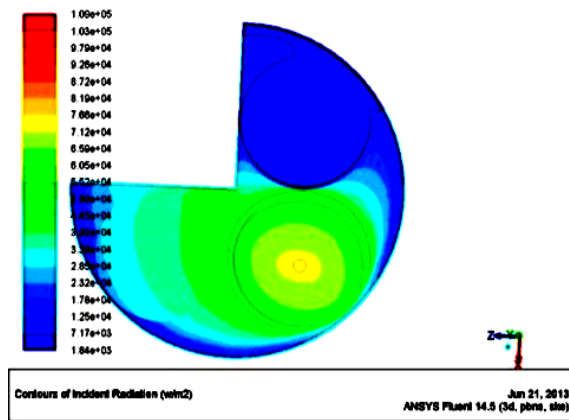


Figura 34 a. Radiación Temperatura (K)

Figura 34 b. Radiación Temperatura (K)

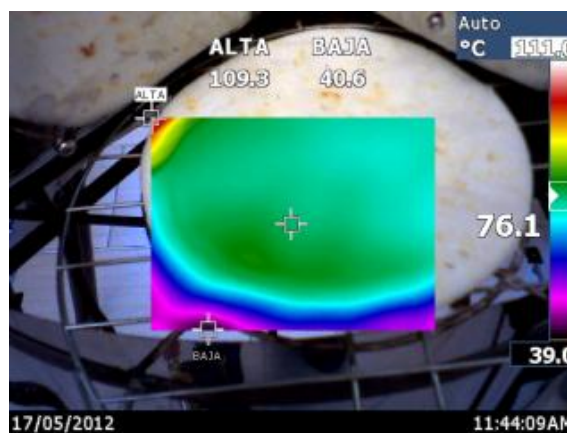
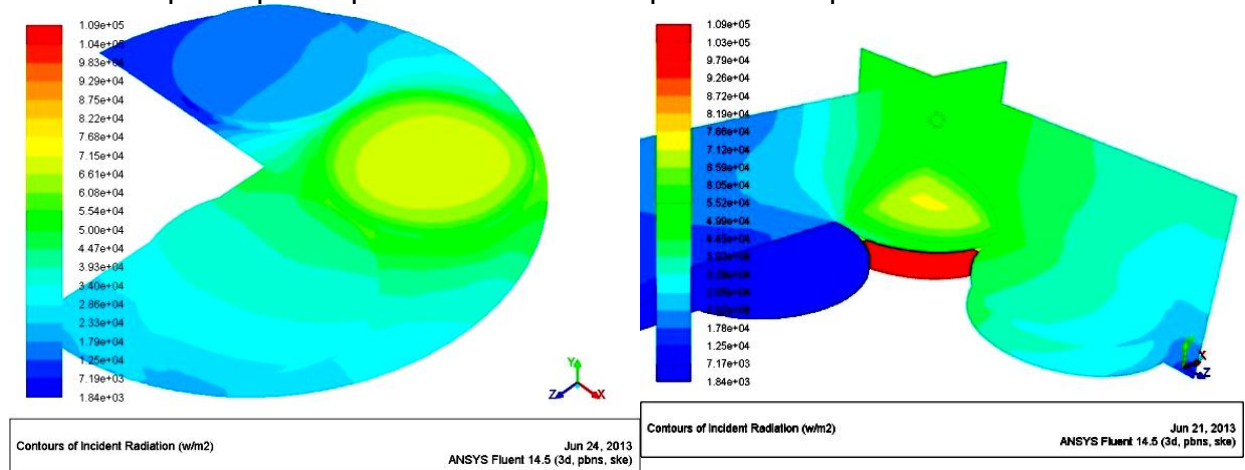


Figura 34 c. Termografía del producto (°C)
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 35** se tiene una representación gráfica del comportamiento de la radiación incidente al interior del prototipo simplificado sobre las superficies del producto. En el **figura 35 a.** un plano paralelo a la base del arreglo que pasa por la base de las arepas; en este se puede ver el comportamiento focalizado sobre el producto y la distribución en cada una de las zonas en que se encuentra dividido el arreglo; La **figura 35 b.** corresponde a un plano perpendicular a la base del arreglo que corta dos arepas y las placas radiante y precalentadoras, en ambas posiciones se logra ver claramente la función de la placa radiante acorde con la zona del horno y además se ve la acción de la radiación en la superficie del producto en las otras dos zonas correspondientes al arreglo del prototipo simplificado.

Figura 35. Representación gráfica del comportamiento de la radiación incidente al interior del prototipo simplificado sobre las superficies del producto.



Fuente: Elaboración propia.

5.4 REGISTROS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DEL PROTOTIPO

Teniendo presente un tiempo de dos minutos en cada posición, cuatro arepas y el giro para invertir la posición, se tiene un tiempo de 22 minutos de proceso de asado y con un promedio de la masa de las arepas 0,598 kg; consumo de combustible 0,0115 m³ de GLP y las medidas de las variables en el producto registradas en la **tabla 28**. Se realizan los cálculos para obtener las energías correspondientes y registrarlas en la **tabla 29**.

Tabla 29. Datos promedio obtenidos sobre la arepa en el proceso de asado en el prototipo.

ITEM	Ti Arepa °C	Tf Arepa °C	Ti sistema °C	Tf sistema °C	Peso i Arepa (g)	Peso f Arepa (g)
\bar{X}	17	90	30	200	169	130
S	0,047	2,5	0,81	5,6	0,5	4,4
CV%	0,27	2,9	2,7	2,8	0,3	3,4

Fuente: Elaboración propia

Del análisis estadístico se tiene que en las medidas de temperatura final existe una mayor incertidumbre, esto concuerda con la termografía realizada a la arepa donde se observa un comportamiento de la temperatura en el producto no homogénea; si se compara con los resultados obtenidos en los equipos a gas y eléctrico, el prototipo presenta una menor incertidumbre, esto se debe al confinamiento del calor y en la cámara mantiene una mayor uniformidad en el producto que en los otros dos casos.

Tabla 30. Datos de energía promedio obtenidos en el funcionamiento del prototipo.

Energía consumida X las arepa kWh	Energía consumida X las parrilla kWh	Energía suministrada X el gas kWh
0,04151	0,00080	0,2273

Fuente: Elaboración propia

Nota. Para el cálculo de la energía consumida por la parrilla se tiene que la masa de las parrillas es de 0,3652 kg, y la temperatura final 200°C e inicial de 30°C. Con estos resultados se cuantifican los indicadores del equipo que se registran en la **tabla 30**.

Tabla 31. Registro de los indicadores calculados con los datos obtenidos en las pruebas correspondientes al prototipo en el proceso de asado de arepas.

Potencia kW	Eficiencia de cocción%	Capacidad de cocción kg/h	Costo del combustible por unidad \$	Capacidad por consumo de combustible kg/m ³
0,62	21.66	1,85	12,52	2.68

Fuente: Elaboración propia

5.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EQUIPOS EVALUADOS

De la comparación de potencias que se muestra se debe prestar atención a que el prototipo tiene un menor valor en comparación con las dos alternativas, por tal motivo esto debe reflejarse favorablemente en el consumo y en los volúmenes de emisión; comparado con la estufa a gas el sacrificio es reflejado en la capacidad de cocción donde en determinadas condiciones de demanda puede ser un factor de desventaja, ya que su respuesta estaría limitada en comparación con las otras dos.

De la comparación entre la potencia y la capacidad de cocción entre los equipos se tiene una condición bastante alentadora para el prototipo ya que prácticamente estaría igualando al equipo eléctrico y superando a el equipo a gas.

No a mayor potencia se tiene mejor eficiencia de cocción, se puede tener mayor capacidad de cocción dependiendo del producto en proceso, lo que se convierte en un factor diferenciador en el consumo y costos de combustibles; si una arepa se somete a una potencia alta con el fin de agilizar el proceso, el resultado será una **no conformidad**, debido a que el producto no cumple con los requerimientos del medio. Por tal motivo el equipo diseñado debe contemplar las exigencias del mercado para obtener un buen desempeño.

El costo del proceso siempre tendrá una prioridad para las PYMES, ya que del adecuado manejo del dinero se obtendrá un mayor beneficio y condiciones más favorables para el desarrollo del sector; en este caso el prototipo muestra en la una ventaja significativa en el costo de combustible por arepa en pesos y se ratifica en la capacidad por consumo de combustible, tanto comparado con la estufa a gas como con el equipo eléctrico, donde el prototipo ratifica su importancia y la de establecer mecanismos de mejoramiento continuo.

Las diferencias en la eficiencia de cocción de 11,54% con respecto a la estufa GLP; llevan a pensar que lo esperado de un 15% efectivamente corresponde a una buena interpretación de las condiciones del sector, ya que su diferencia radica en el prototipo como tal debido a las imprecisiones geométricas y a las fugas presentes en el prototipo fabricado.

Referente a la comparación con el equipo eléctrico la diferencia es de 5,56% a favor del prototipo y la presentación del producto terminado muestra un comportamiento más adecuado a los requerimientos del medio.

5.6 DATOS SOBRE EL ANALIZADOR DE GASES

En la **tabla 32** se presenta una recopilación de los datos promedios obtenidos en 6 pruebas consecutivas en el equipo analizador de gases, utilizando como combustible gas propano y con 3% de O₂ real, las pruebas se realizaron cada dos minutos.

Tabla 32. Datos promedios de los registros del análisis de gases al prototipo.

ítem	Ta ⁰ C	Tg ⁰ C	O ₂ %	CO ₂ %	CH ₄ %	CO ppm	Ex. Aire	Perd. Humos	Porcentaje Eficiencia
Prom	24,03	32,17	18,76	0,83	0,06	4,67	>10	4,67	95,33
S	0,110	0,765	0,156	0,047	0,004	0,677	0	0,647	0,647
AC%	0,46	2,37	0,83	5,65	8,32	14,518	0	13,87	0,678

Fuente: Elaboración propia

Al analizar desde los referentes de emisiones la validez de estos resultados se concluye que el prototipo se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento y que los niveles de emisión no presentan riesgos significativos para la salud de los operarios y manipuladores, ya que según la norma NTC 2832-1 tercera edición, NTC 3527 primera actualización, NTC 4082 se establece para los hornos y gratinadores que utilizan gas G30, un porcentaje de CO₂ de 14,0% y valores entre 0,1 y 0,2% de CO, referido a los productos de combustión exentos de aire y de vapor de agua; las trazas de CH₄ son indicadoras de una combustión deficiente debida posiblemente al confinamiento del quemador que de alguna manera puede influir debido a requerimientos de aire secundario. El bajo nivel de CO₂ se da por la gran cantidad de aire de dilución que tienen los humos por tomar aire atmosférico en la parte inferior del prototipo. Además, se deben recalcular los valores con base en un porcentaje de O₂ de 3% en los humos.

5.7 RESULTADO ENCUESTA SOBRE ACEPTACIÓN DEL PRODUCTO

Las encuestas se realizaron con el propósito de obtener información de la población consumidora de arepas antioqueñas tradicionales, establecida en los estratos 1, 2 y 3, se determinó el espacio muestral de tal forma que permitiese minimizar el tiempo de captura de la información, se diseñó el formato de tal manera que involucre las principales características del producto y que confirme la hipótesis planteada de que la población a evaluar efectivamente es conocedora del producto; entendido el objetivo de que se le asignen valores a las características del producto de tal manera que el evaluador tenga un rango de valor razonable se plantea una escala de 1 a 5. La encuesta se realizó en las instalaciones del ITM en la sede de Fraternidad y se seleccionaron aleatoria y voluntariamente a los encuestados; a continuación se presenta la ficha técnica de la encuesta.

En la ciudad de Medellín se encuentra la mayor cantidad del mercado de arepas y son los estratos 1, 2,3 de la población, en donde se consume el mayor porcentaje del producto; entonces, una muestra significativa sería la población concentrada en el ITM, ya que en un alto porcentaje los estudiantes de la Institución pertenecen

a estos estratos de la población, para el estudio se seleccionó la sede de Fraternidad con una población aproximada de 10.000 estudiantes²⁶.

Tamaño de la muestra:

Para **nc.** 95%= 95

NC= nivel de confianza

Margen de error = 10%

Resultados de la encuesta a las preguntas

¿Consume usted la tradicional arepa antioqueña?

En la **Figura 36** se presenta el resultado a esta pregunta, el 97% afirman que consumen el producto y el 3% restante afirma no consumir el producto.

Figura 36. Resultado a la pregunta consumo de arepa tradicional antioqueña.



Fuente: Elaboración propia

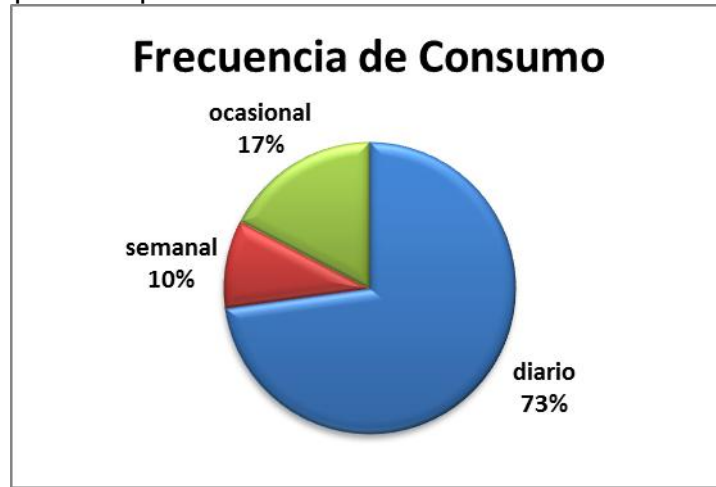
Este resultado comprueba que la mayoría de la población de los estratos 1, 2, 3; que corresponde a una muestra tomada entre los estudiantes del ITM donde afirman que son consumidores del producto, tal como lo asevera el estudio realizado por Raddar.

¿Con qué frecuencia consume usted arepa?

En la Figura 37 se presenta el resultado y se destaca que el 73% de los encuestados afirma consumir diariamente el producto, el 10% lo consume semanalmente y un 17% es consumidor ocasional.

²⁶ (<http://www.fao.org/docrep/005/Y3779S/y3779s09.htm#TopOfPage>)

Figura 37. Resultado correspondiente a la pregunta con qué frecuencia consume la tradicional arepa antioqueña.



Fuente: Elaboración propia

Este resultado confirma que en su mayoría la población encuestada es consumidora diaria del producto como tal y por esto es conocedora de las características diferenciadoras.

La Tabla 33 presenta el resultado numérico de la valoración de las características principales de la arepa tradicional antioqueña obtenida de las encuestas realizadas.

Tabla 33. Valoración de las principales características de la arepa tradicional antioqueña.

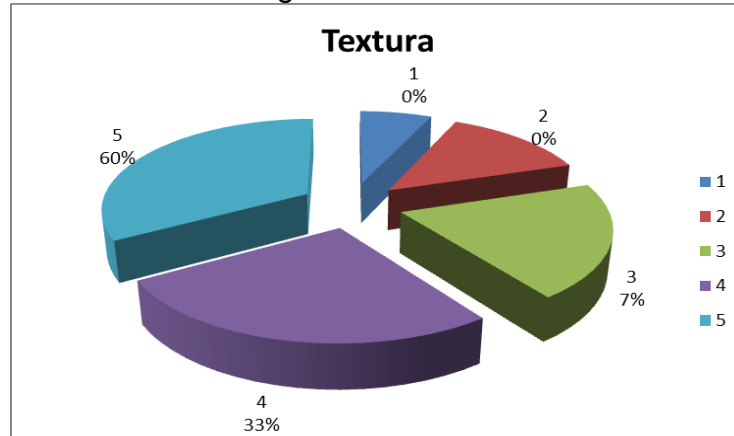
Ítem	1	2	3	4	5	Total
Sabor	0	3	15	16	58	92
Textura	0	0	7	30	55	92
Aroma	0	0	12	34	46	92
Color	0	0	3	18	71	92

Fuente: Elaboración propia.

De la observación de esta tabla se obtiene que la valoración del producto en general, sea superior de 3, lo que representa un resultado favorable, y se destaca la cantidad del valor 5 de todos los aspectos de la arepa procesada en el horno diseñado.

A continuación en las **Figuras 38, 39, 40, 41** se realiza una representación gráfica de cada una de las características evaluadas.

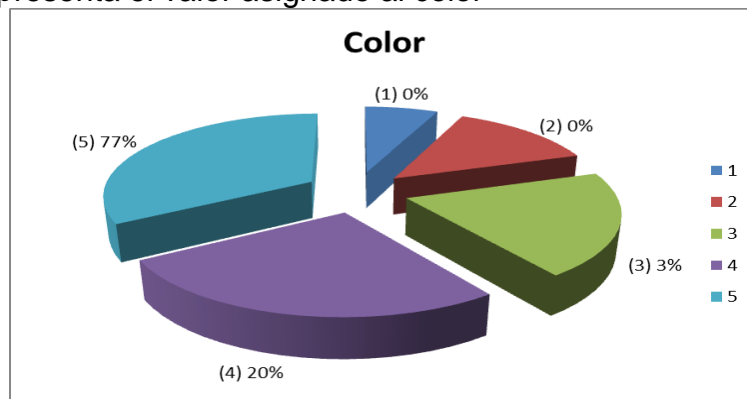
Figura 38. Representa el valor asignado a la textura



Fuente propia

Los valores obtenidos en textura son bastante importantes para el producto ya que en un 93% de la población encuestada lo valoró entre 4 y 5; la textura es determinante en el proceso de asado de una arepa y es indicador de que la contracción de la arepa es un acertado parámetro para determinar el tiempo de cocción del producto.

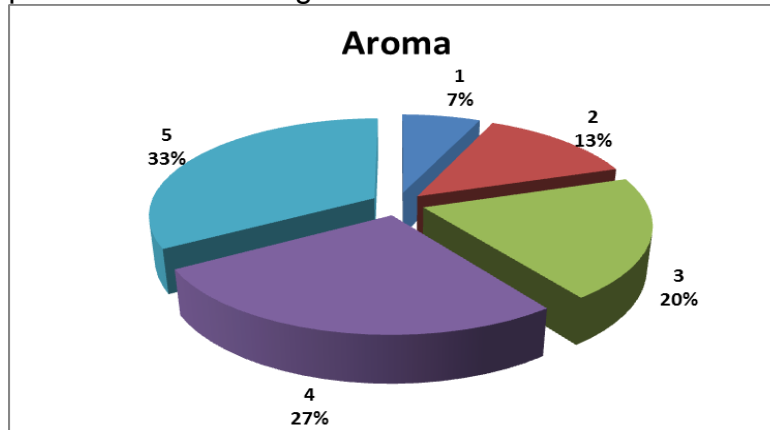
Figura 39. Representa el valor asignado al color



Fuente: Elaboración propia.

El color es una característica que similar a la anterior es excelente, prácticamente el 97% consideran muy bueno o bueno; los valores obtenidos en color son determinantes en el proceso de asado puesto que de él depende la presentación del producto y la conformidad o no conformidad por parte del cliente.

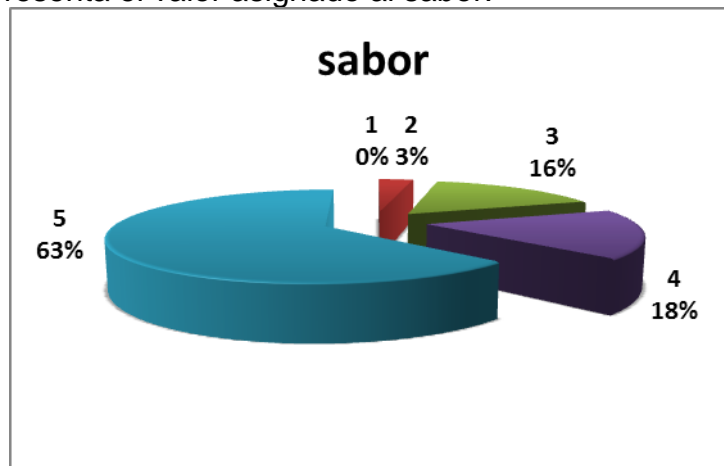
Figura 40. Representa el valor asignado al aroma.



Fuente: Elaboración propia.

Si bien es cierto el aroma es natural del producto un 87% lo considera muy bueno o bueno; aquí queda la duda del 13% que lo considera aceptable dado que en productos naturales se debe tener claridad del concepto; esto puede tener explicación en el 27% de la población que registra una frecuencia no diaria en el consumo, debido a que el producto que consumen puede ser asado por diferentes medios de cocción.

Figura 41. Representa el valor asignado al sabor.



Fuente: Elaboración propia.

El sabor, al igual que el aroma, corresponde a un producto natural y podría asimilarse a la misma condición del porcentaje de consumidores no diarios, con un nivel de aceptación del 80% se podría decir que es un buen indicador pero queda la incógnita ¿si en este equipo con su tipo de asado, en el cual los humos de combustión no se encuentran en contacto directo con el producto se ven castigados por el consumidor tanto el aroma como el sabor?

6 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones del prototipo se puede afirmar que el prototipo diseñado en general muestra indicadores favorables y en particular una mayor eficiencia de cocción de las arepas tradicionales antioqueñas en un 11,54% respecto a la estufa a GLP, y un 5,56% respecto a la estufa eléctrica que con mejoras como la precisión geométrica, corrección de fugas y adecuación de parrillas, la eficiencia puede lograr los niveles propuestos en la hipótesis del 15%.

El prototipo diseñado muestra una condición muy similar al equipo eléctrico en la relación de potencia y capacidad de cocción, lo que permite diseñar equipos para el asado de arepas en proporciones acordes con la demanda y que mientras se mantengan las diferencias de precios entre las fuentes de combustibles, incluso se equiparen, es conveniente para el sector la implementación de este equipo.

En el caso de proceso de asado de arepas no se tiene una mejor eficiencia de cocción, cuando se tiene mayor potencia en el equipo se puede tener mayor capacidad de cocción pero el resultado es un producto que no garantiza la conformidad del producto.

Dado que la potencia del prototipo es menor, el consumo y las emisiones de gases son menores que en los equipos tradicionales, esto se refleja en el costo por unidad y en la capacidad por consumo, y constituye un ahorro para las PYMES.

El uso de herramientas computacionales como CFD, los módulos de diseño y mallado de ANSYS FLUENT permiten una mejor comprensión e interpretación de los problemas de estudio, ya que durante el proceso de diseño se exigen algunas modificaciones a tener presente por el diseñador a favor de los resultados esperados; esto propone cambios en la forma como tradicionalmente se han realizado los diseños de equipos en general y que el trabajo conjunto entre el prototipado y las simulaciones se convierten en un método de mejoramiento continuo bastante útil para el diseño de productos (maquinaria y producto final).

Entre los diferentes resultados numéricos existen discrepancias en las simulaciones y las mediciones, pero entendiendo que este es un proceso de diseño, que es un prototipo son aceptables las diferencias encontradas hasta en un 10%, como rezan los estándares. La excepción es más que aceptable si se tiene en cuenta que este es el primer horno modelo para este tipo de aplicación.

La valoración de las características del producto por parte de los consumidores refleja un buen comportamiento del equipo diseñado, lo que sugiere que el prototipo realizado se encuentra a la altura de un producto ampliamente reconocido en el mercado.

7 RECOMENDACIONES

- Se sugiere dar continuidad a la propuesta estudiando el comportamiento de los componentes del equipo en diferentes condiciones de trabajo.
- Buscar alternativas de diseño de partes y proponer condiciones para la creación de especificaciones técnicas que brinden las garantías de funcionamiento acordes a su función, ampliando la difusión de los sistemas CAD/CAM/CAE, hacia la aplicación en problemas cotidianos para brindar soluciones que reflejen e impacten en las políticas de producción más limpia y el uso racional de la energía.
- Realizar pruebas de campo en MYPIMES para evaluar la confiabilidad del equipo y en lo posible realizar un escalado del mismo para aumentar la capacidad de procedimiento.

7.1 AGENDA DE INVESTIGACIÓN

Dado que las políticas PML y URE son consideradas un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, se propone en esta agenda concentrarse en la tradicional industria de la arepa y se promueve realizar estudios adecuados, coherentes y concertadores con las personas del sector de alimentos.

De este trabajo se concluye que las aplicaciones deben dirigirse fundamentalmente así:

- Estudios sociales y de agremiación tendientes a que exista una buena promoción, un mejoramiento continuo, competitivo y técnico de esta industria.
- Estudios orientados a la mejora y modernización de los equipos utilizados para el proceso y elaboración de arepas con miras a mejorar y optimizar las condiciones de producción y motivando el consumo del producto.
- Articulación de la cadena productiva del maíz, el Municipio de Medellín y las universidades; con el objetivo de dar a conocer los adelantos tecnológicos asentados en la industria de las arepas.

Trabajos específicos que se desprenden de este estudio:

- Estudios de vida útil del equipo y sus componentes.
- Diseño de sistemas automáticos de control y seguridad e higiene que hagan competitivo el prototipo.
- Concientiza al productor sobre la importancia, en tiempo y economía, en la utilización de los equipos.
- Aplicaciones de los conceptos de radiación IR y tratamiento térmico utilizados en este equipo y que se puedan utilizar para otros productos alimenticios; además, el desarrollo de productos nuevos que se desprendan de esta labor.
- Estudios de las formas de producción de los componentes del prototipo desarrollado con el propósito de estandarizar y realizar una producción de partes y ensamble.
- Estudio de las propiedades físicas y químicas realizadas al producto asado en este equipo.
- Simulaciones dinámicas del prototipo automatizado.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Álvarez, C.A. (et all 2012) *El uso de energía en microempresas tradicionales: eficiencia, innovación y gestión*. Medellín: Fondo Editorial ITM 1ª ed. pp 118 a 122.
- Alan, H. B. (2007). *Uso eficiente de la energía en sistemas térmicos*. Centro de publicaciones UN Medellín, 54-60.
- ANSYS Fluent. Inc. (04 de 2009). *ANSYS Fluent CFX Reference guide*. ANSYS Fluent CFX Reference guide. U.S.A.: ANSYS Fluent Inc.
- Arrieta A., et. al. (2006). *Análisis de los parámetros para el diseño y optimización de un tubo radiante*. Facultad de Ingeniería, 31-39.
- ASTM. (2003). 1521. *Standard Test Methods for Performance of Range Tops*.
- Baukal E., C. J. (2003). *Heat Transfer from Burners*. En *CRC, Industrial Burners Hand Book* (págs. 10-18). LLC.
- Consumer Eroski. (2007). *Placas vitrocerámicas y de inducción*. ANÁLISIS, 43-47.
- Estrada, J. (No 289 de octubre de 2006). *Arepas antioqueñas*. La hoja de Medellín, págs. 18-19.
- FIDE. (23 de 04 de 2009). Especificación Sello FIDE No. ESP4445. *Máquinas Tortilladoras*. Mecanizadas para maíz. México, FIDE.
- Hederich, A. (2005). *Situación y necesidades de la pequeña y mediana empresa*. Civilizar.
- Herrera, B.; et al (2009); *Modelos para el estudio fenomenológico de la combustión sin llama con simulación numérica*; Revista Ingeniería e Investigación vol. 29 no. 2, 70-76
- H. M.Y; et al, (2011). A methodology to model flow-thermals inside a domestic gas oven. *Applied Thermal Engineering*, 103-111.
- HOOF, B. V., & Herrera, C. M. (2007). *La evolución y el futuro de la producción más limpia en Colombia*. Universidad de Los Andes, dossier 6, Ingeniería.
- LAM, H. (1999). *Application of Far Infra-red Radiation to Cooking of Meat Products*. Journal of Food Engineering, 203-208.

- M., M. (2005). *Eficiencia energética en el sector industrial de fabricación de pan*. Alimentación Equipos y Tecnología, 83-95.
- M., P. & all, et al. (2003). *Características Físico-Químicas, Organolépticas y Reológicas de arepas procesadas a partir de maíces de alta calidad proteica (QPM)*. *Ingeniería y Competitividad*, 36-43.
- Meré M. Javier, et al, (2009). Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente. Universidad Carlos III de Madrid.
- Nalan Uysal, G. S. (2009). *Optimization of microwave–infrared roasting of hazelnut*. *Journal of Food Engineering*, 255–261.
- Newby, D., Quinn, & John (2006). *Industrial Burners Handbook*. CRC.
- NMX-R-101-1974. (1974). *Clasificación de Hornos Industriales*. Norma Mexicana.
- Colombia. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (2001). 2832. *Eficiencia de un gasodoméstico para la cocción de alimentos, parte dos; uso racional de la energía*.
- Colombia. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). 3527 primera actualización, definiciones reglas comunes aplicables al ensayo de artefactos para uso doméstico y comercial que emplean gases combustibles.
- Colombia. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). 4082 equipos de cocción para uso comercial que funcionan con gas. Requisitos de seguridad.
- P.O. Logerais A, A. B. (2010). *Modelling of an infrared halogen lamp in a rapid thermal system*. *International Journal of Thermal Sciences*, 1437-1445.
- Raddar. (2006). *Análisis de comportamiento de consumo en 2005 y 2006*. El consumidor Colombiano, 35-80.
- Sánchez, L. M. (01 de 2002). *Dinámica Industrial e Innovación en la Industria Productoras de Máquinas Tortilladoras*. Xochimilco, México.
- Shin-Yee Wong, et al. (2007). CFD modeling of an industrial continuous bread-baking process. *Journal of Food Engineering*, 888–896.
- Vargas F., et. al. (2009). *Fabricación de tubos de carburo de silicio para uso como cuerpo radiante en hornos y sistemas de calentamiento*. *Dyna*, 233-242.

CIBERGRAFÍA

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (12 de 10 de 2009). Disponible en:
<http://www.metropol.gov.co/produccionmaslimpia/contenidos.php?seccion=1>
- Basel. (22 de 03 de 1989). Disponible en: www.basel.int/text/con-s.pdf
- Burío, J. M. (18 de 10 de 2010). <http://www.aragoninvestiga.org/taq/potencia/>
- Centro Nacional de Producción Más Limpia. (19 de 09 de 2010). Manual de Introducción a la Producción Más Limpia en la Industria. Disponible en:
<http://www.metropol.gov.co/produccionmaslimpia/contenidos.php?seccion=1>
- FAO. Guía para encuestas de demanda, oferta y abastecimiento de combustibles de madera. Programa de asociación comunidad Europea - FAO (2000 - 2002). Programa de manejo forestal sostenible. Disponible en:
(<http://www.fao.org/docrep/005/Y3779S/y3779s09.htm#TopOfPage>)
- Ferro, C. (Número 2 de 01 de 2009). Mejoramiento de la cadena productiva del maíz.
<http://www.amco.gov.co/Gaceta/boletin%202.pdf>
- Garzón Ronaldo. (29 de 4 de 2010). Disponible en:
<http://www.portafolio.com.co/negocios/empresas/2009-03-16/ARTICULO-WEB>
- Infraglo. (7 de 12 de 2010). *infraglo*. Recuperado el 7 de 12 de 2010, de
www.infraglo.co.uk
- ITM. Instituto Tecnológico de Antioquia. Disponible en:
<http://fondoeditorial.itm.edu.co/Libroselectronicos/LibroUre/index.html>
- JIRA. (18 de 04 de 2010). Japan Far Infrared Rays Association: Disponible en:
www.jasew.eccj.or.jp/technologies-s/sector.html
- MEN, & UPME. (9 de 08 de 2010). si3ea.
<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/URE/edure.pdf>
- Naciones Unidas. (14 de 06 de 1992). Agenda local 21. Disponible en:
<http://www.oarsoaldea.net/agenda21/es/node/8>
- PNUMA. (20 de 03 de 2000). UNEP. Disponible en:
www.unep.org/ozone/pdfs/Montreal-Protocol-Booklet-sp.doc
- Portafolio. (14 de 09 de 2010). Disponible en:
<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-3363508>
- StockholmConvention on president organic pollutants. (Recuperado 22 de 03 de 2001).
<http://www.chm.pops.int/Home/tabid/36/language/es-CO/Default.aspx>

Tokyo Gas Co. Ltd, *et all.* (14 de 10 de 2010). Disponible en:
http://www.igu.org/html/wgc2003/WGC_pdffiles/10478_1045133061_21438_1.pdf

UN. (27 de 06 de 1980). <http://www.derechos.org/nizkor/ley/viena.html> Disponible en:
www.append.es/datos/estudios/archivo13.xls consultado 19- 12- 2012

ANEXOS

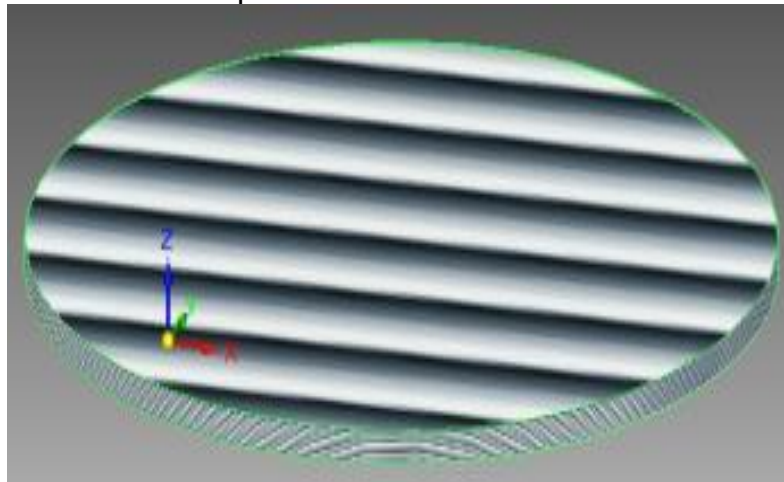
ANEXO A. PROCESO DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO

Descripción del proceso de diseño de un prototipo de horno para el asado de arepas tradicionales antioqueñas dadas los criterios de diseño del prototipo; para la realización del proceso de diseño se utilizaron los software CAD Solid Edge. Versiones ST 2 y 5 y ANSYS DM versión 14.5.

LA AREPA

Se presenta la geometría equivalente a una arepa tradicional antioqueña; se estandariza a diámetro de 170 milímetros y una altura equivalente a 6 milímetros

Figura 1. Geometría de la arepa

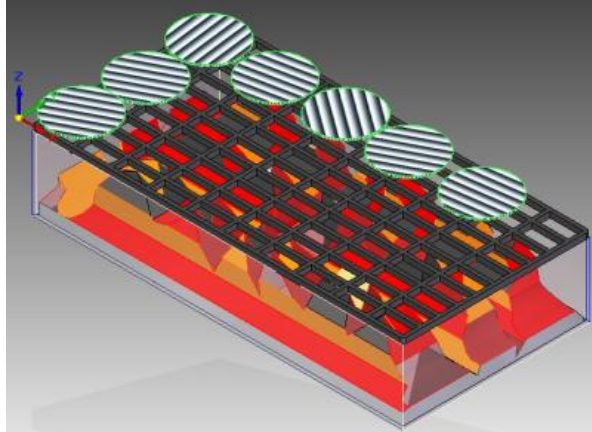


Fuente: Elaboración propia

ANTECEDENTES DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA ASAR AREPAS

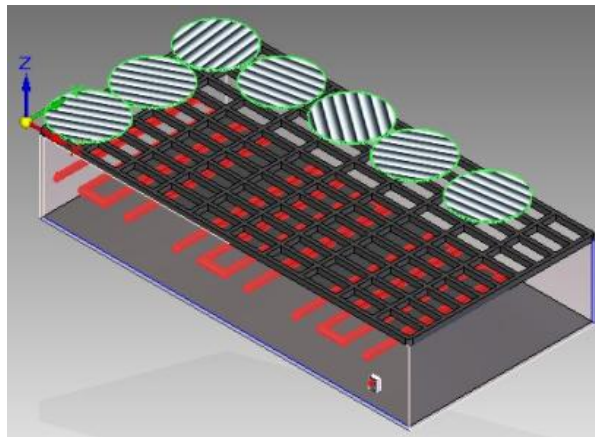
A continuación se presenta los arreglos correspondientes a equipos tradicionalmente utilizados para el proceso de asado de arepas; se estandarizan las condiciones geométricas en unas dimensiones de 1000 x 500 x 200 mm, con el objetivo de minimizar la variabilidad y así facilitar las condiciones del diseño del prototipo.

La figura 2. Corresponde al arreglo de un equipo que funciona a carbón de leña.



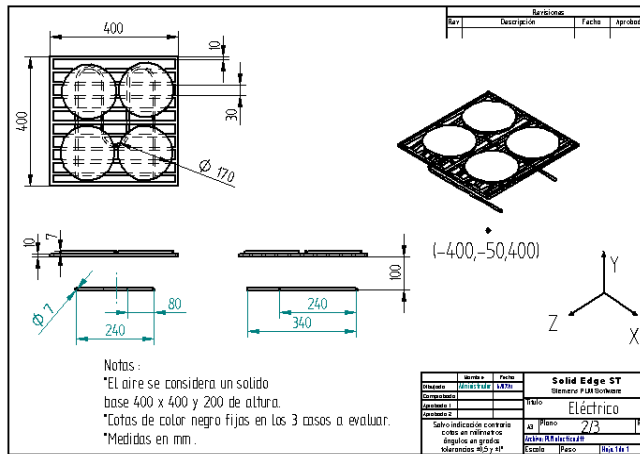
Fuente: Elaboración propia

La figura 3. Corresponde al arreglo de un equipo que funciona con resistencia eléctrica.



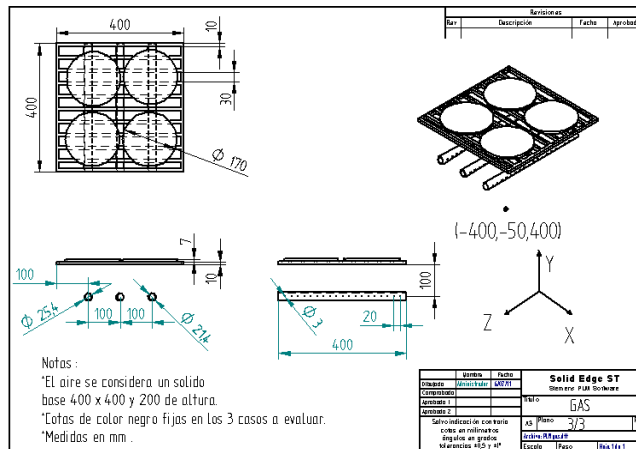
Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Equipo eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Equipo a GLP



Fuente: Elaboración propia

MODELOS SEGÚN FUENTE DE ENERGÍA

Elaboración de los modelos geométricos de cada uno de los arreglos según la fuente de combustible utilizados para aprovechar la simulación en el software ANSYS Fluent y obtener datos que nos faciliten el aprovechamiento energético del prototipo.

Las figuras 8, 9, 10. Corresponden a los modelos construidos para la simulación en Fluent.

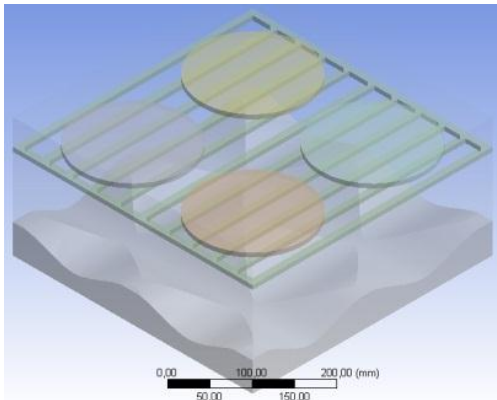


Figura 8. Modelo carbón de leña

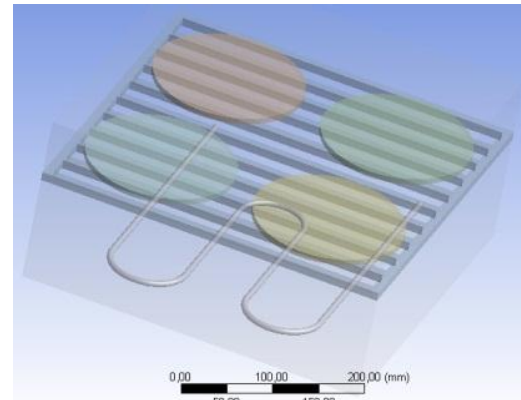


Figura 9. Modelo resistencia eléctrica.

Fuente: Elaboración propia

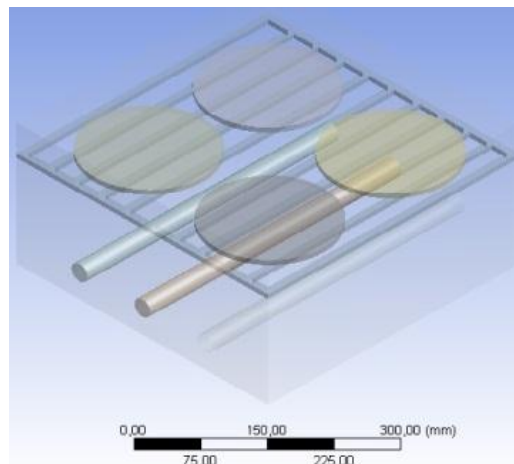


Figura 10. Modelo con flautas de GLP.

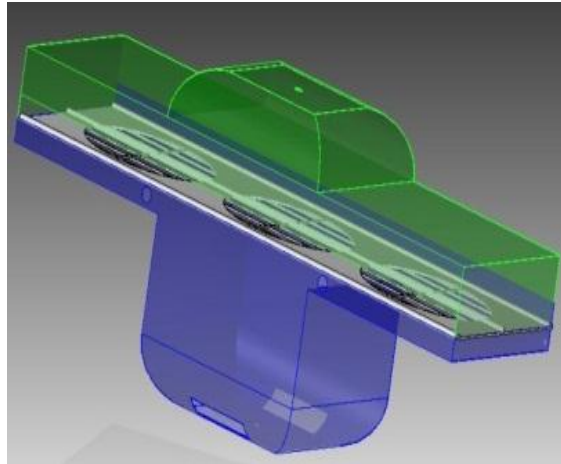
Fuente: Elaboración propia

IDEAS PRELIMINARES DE PROTOTIPO

Ideas preliminares para la elaboración de un prototipo que nos permita aumentar la eficiencia del asado de arepas, partiendo de las recomendaciones y resultados obtenidos en los pasos anteriores.

La figura 11. Muestra un arreglo en línea de 3 arepas en las cuales se estaría aprovechando el calor de los humos por confinamiento y la radiación en la posición central.

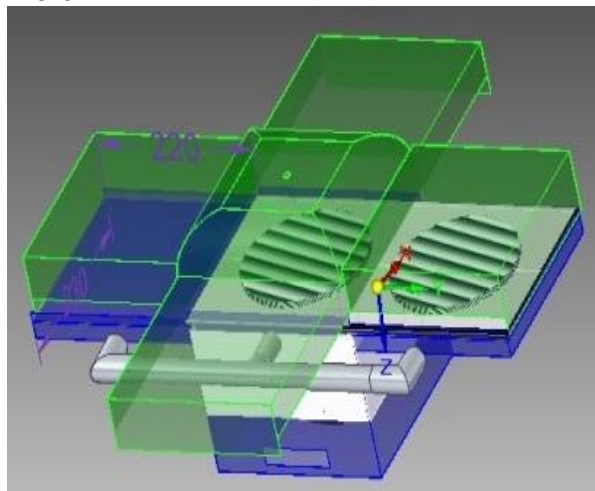
Figura 11. Arreglo en línea



Fuente: Elaboración propia

La figura 12 propone un arreglo en cruz y la posibilidad de desviar los humos de combustión a las posiciones laterales de tal forma que se aprovechen en el precalentamiento, las arepas podrían cambiar de lugar mediante el giro de la tapa.

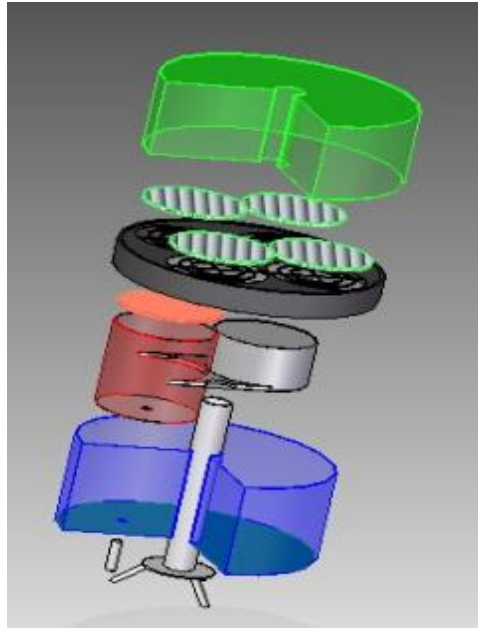
Figura 12. Arreglo en cruz



Fuente: Elaboración propia

La figura 13 bosqueja un arreglo circular, combinando el giro del producto sobre la placa y aprovechando el confinamiento en el precalentamiento y enfriamiento controlado, las arepas podrían cambiar de lugar mediante el giro de la parrilla. Se toma la decisión de fabricar este prototipo debido a que combina las ventajas de los anteriores y permite una adecuada operación y funcionamiento que facilita el trabajo del operario, el mantenimiento y la toma de muestras y datos requeridos para dar garantía en las pruebas a que será sometido.

Figura 13. Arreglo circular



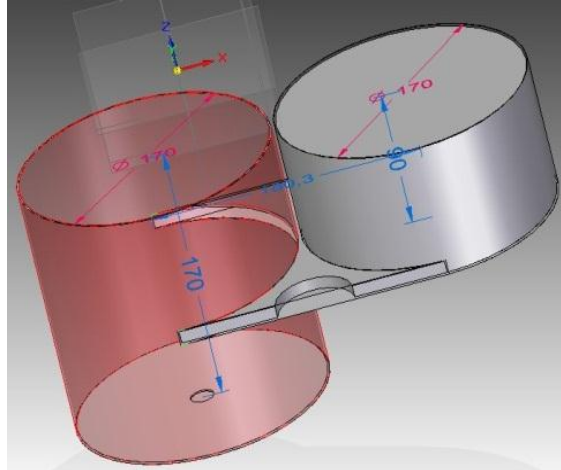
Fuente: Elaboración propia

PARTES A FABRICAR PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL ARREGLO CIRCULAR

El siguiente es el bosquejo de los componentes que se requieren para un óptimo funcionamiento del prototipo y que no son de fácil consecución en el mercado.

La figura 14 muestra el ducto de humos, el cual porta la placa de carburo de silicio y permite el direccionamiento de los humos de combustión.

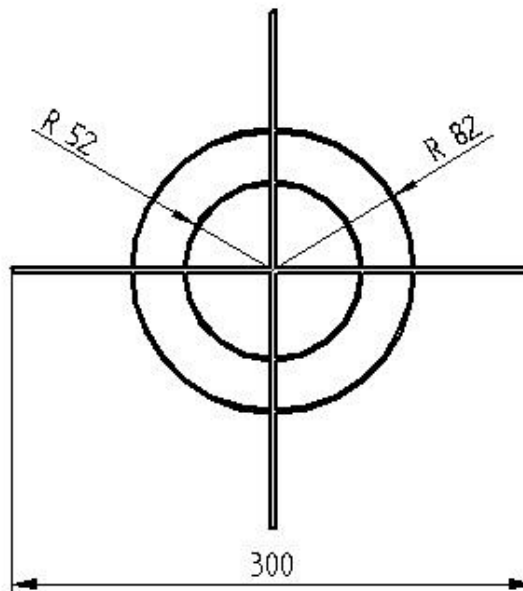
Figura 14. Ducto de Humos



Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se aprecia la parrilla en la cual se grafica el diámetro indicador de la contracción del producto con el fin de que facilite el posicionamiento correcto de la arepa en las cámaras del horno.

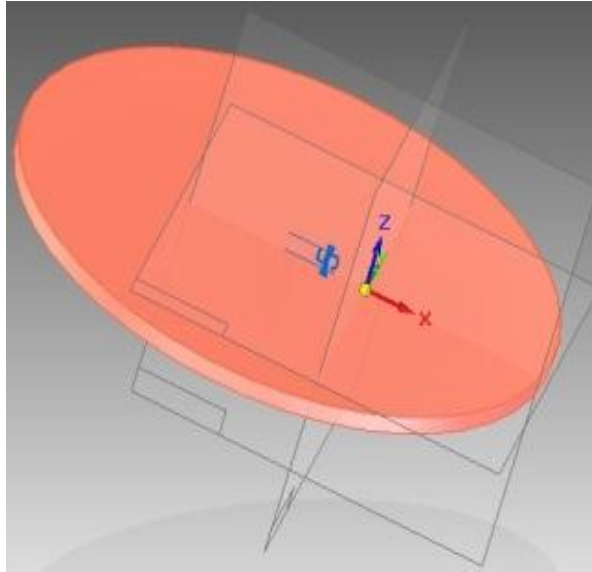
Figura 15. Parrilla porta arepa



Fuente: Elaboración propia

En la figura 16, se aprecia el radiante de carburo de silicio en forma circular con el propósito de que se adapte fácilmente al ducto

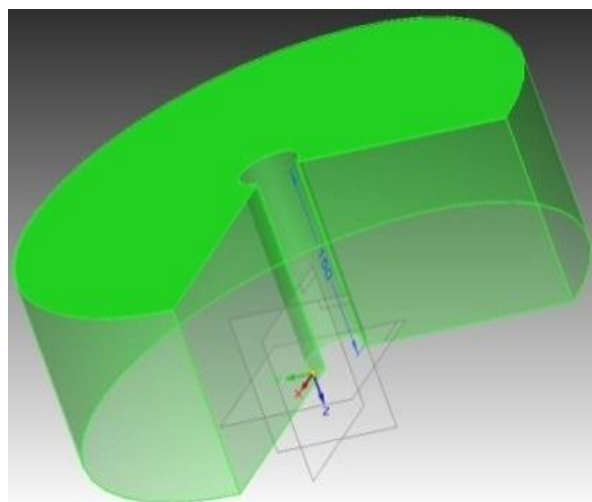
Figura 16. Placa circular de CSi



Fuente: Elaboración propia

El corte que se observa en la Figura 17, corresponde a la Tapa del arreglo que garantiza el confinamiento del calor y debe estar aislada para evitar las pérdidas calóricas por las paredes.

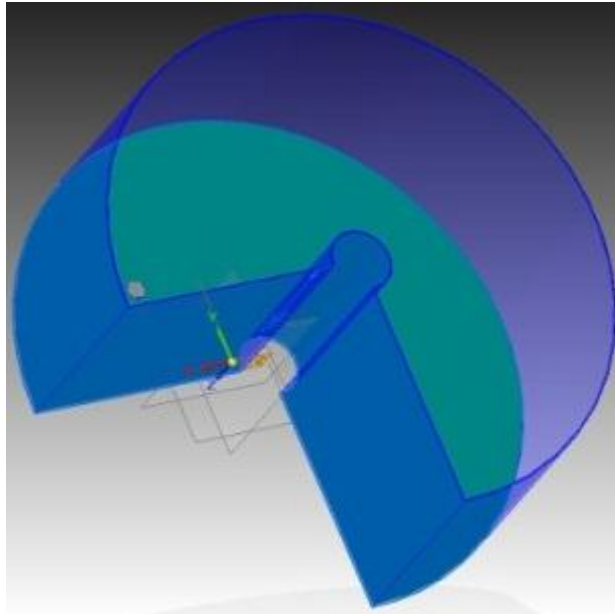
Figura 17. Tapa



Fuente: Elaboración propia

La base del sistema que sirve de sustento a los componentes internos de combustión y al ducto de humos se detalla en la Figura 18.

Figura 18. Base



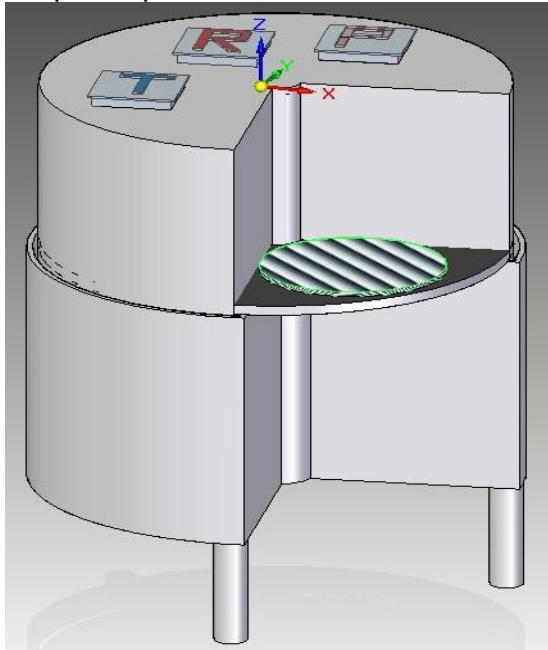
Fuente: Elaboración propia

ENSAMBLE DE PARTES

A continuación y luego de algunos ajustes se plantea el sistema ensamblado acorde a su funcionamiento y se presenta con accesos a cada una de las cámaras del horno para facilitar el proceso de medición.

La Figura 19. Muestra el ensamble del prototipo definitivo con sus diferentes cámaras y producto en proceso.

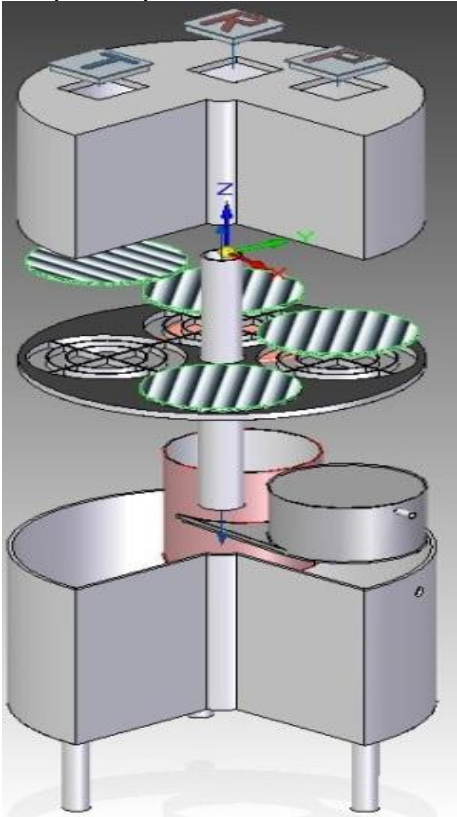
Figura 19. Ensamble del prototipo



Fuente: Elaboración propia

La Figura 20. Corresponde al explosionado del prototipo y deja visualizar cada uno de los componentes en posición de trabajo.

Figura 20. Explosionado del prototipo



Fuente: Elaboración propia

La Figura 21 es el renderizado del modelo en funcionamiento y destaca la placa infrarroja de carburo de silicio que es a quien corresponde el trabajo térmico.

Figura 21. Renderizado del prototipo



Fuente: Elaboración propia

**ANEXO B. TABLA DESCRIPTIVA DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN
UTILIZADOS**

Descripción	Marca	Rango	Res.	Apre.
Pinza amperimétrica de gancho 25 mm; modelo 312b.	BK Precisión	0 a 600 AC/DC	100 mA	2% ±10 dgt
Cronómetro. Para la medición de tiempos de asado y consumo de combustible.	MAX Electronics	-	0,01 seg.	± 0,01%.
Manómetro control de presión a la salida del tanque de combustible.	Treerice	0 a 160 psi	2 psi	±2%.
Balanza analítica electrónica. Masa de las arepas antes y después del proceso de asado.	Acculab	de 0.1- 4100 g	0,1 g	± 1,0%
Analizador de gases GA21 plus.	Madur O ₂ CO NO	0 a 1000°C 0 a 21% 0 a 20000 ppm 0 a 5000 ppm	1°C 0.01% 1 ppm 1 ppm	- - - -
Termómetro de radiación infrarroja relación focal 30:1. con termocuplas tipo K para mediciones de hasta 1.372°C	Extech	-60°C a 500°C	0,1°C	± 1,0%
Gasómetro medición de flujo de combustible, presión de trabajo 10 psi.	SENSUS MR-8	capacidad máxima 7,79 m ³ /h (129,8 L/min)	0,0005 m ³ /h	0.005 m ³
Cámara termográfica Ti25 corrección de emisividad en pantalla; registro de temperaturas al interior del horno y en la superficie de la arepa.	Fluke	-20°C a +350°C	15 cm para infrarrojo 46 cm para luz visible	± 2 °C