

**MODELIZACIÓN DE UNA MICRO RED FOTOVOLTAICA APLICADA A EQUIPOS DE COCCIÓN
POR INDUCCIÓN PARA EL REEMPLAZO DE GLP**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

**MODELIZACIÓN DE UNA MICRO RED FOTOVOLTAICA APLICADA A
EQUIPOS DE COCCIÓN POR INDUCCIÓN PARA EL REEMPLAZO DE GLP**

AUTOR:

AUGUSTO JONATHAN RIOFRIO TRUJILLO

DIRECTOR:

DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA

Quito, Febrero de 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Augusto Jonathan Riofrio Trujillo autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado u su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito D.M, 19 de Febrero de 2015

Augusto Jonathan Riofrio Trujillo

CC: 172255113-0

Autor

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la tesis, así como la investigación respecto a la “MODELIZACIÓN DE UNA MICRO RED FOTOVOLTAICA APLICADA A EQUIPOS DE COCCIÓN POR INDUCCIÓN PARA EL REEMPLAZO DE GLP” realizada por el Sr. Augusto Jonathan Riofrio Trujillo, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito D.M, 19 de Febrero de 2015

Ing. Diego Francisco Carrión Galarza
DIRECTOR

DEDICATORIA

JONATHAN RIOFRIO TRUJILLO

Este proyecto es dedicado con total cariño para dos personas importantes en mi vida cuyo amor, esfuerzo, dedicación y ejemplo se ve reflejado hoy en la culminación de este trabajo, mis padres.

A mi familia en general, por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años, compartiendo conmigo los buenos y no tan buenos momentos.

A las personas que he conocido a lo largo de mi vida estudiantil y que han contribuido en mi formación primero como persona y después como profesional.

AGRADECIMIENTO

JONATHAN RIOFRIO TRUJILLO

Agradecerle a Dios por las bendiciones recibidas día a día y por darme la fuerza y sabiduría necesarias para poder culminar este trabajo. A mis padres por el infinito cariño y apoyo brindado siempre.

A la Universidad Politécnica Salesiana, mi segundo hogar durante los últimos años, por la acogida brindada. A los profesores de la institución por los conocimientos adquiridos durante mi etapa estudiantil.

Al Ing. Diego Carrión, Director de este trabajo, por el apoyo y la confianza brindada para el desarrollo del mismo. También me gustaría dar un agradecimiento especial al Ing. Diego Vaca, miembro del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) por el apoyo y las facilidades brindadas hacia mi persona.

Finalmente agradecer a todas las personas que creyeron en mí, durante mi etapa académica.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
PROCESOS DE COCCIÓN DE ALIMENTOS	3
1.1 Cocción de Alimentos.....	3
1.1.1 Beneficios de la cocción de los alimentos.....	4
1.1.2 Desventajas de la cocción de alimentos	4
1.2 Procesos de Cocción	5
1.2.1 Cocción por Calor Seco.....	7
1.2.2 Cocción por Calor Húmedo.....	8
1.2.3 Cocción por Calor Mixto o Combinado	8
1.2.4 Cocción a Presión	9
1.2.5 Cocción por Microondas	9
1.3 Energías primarias empleadas para la cocción de alimentos.....	9
1.3.1 Carbón	11
1.3.2 Kerosene	13
1.3.3 Gas Licuado de Petróleo (GLP)	14
1.3.4 Electricidad.....	16
1.3.5 Otros Combustibles	17
1.4 Equipos actuales para sistemas de cocción en hogares.....	18
1.4.1 Cocinas de GLP.....	18
1.4.2 Cocinas Eléctricas de Resistencia	20
1.4.3 Cocinas Eléctricas Vitrocerámica.....	21
1.5 Aplicaciones del Gas Licuado de Petróleo (GLP) para el Caso de Estudio.....	22
1.5.1 Plan Nacional de Cocción Eficiente	24
CAPÍTULO II.....	28
COCINAS DE INDUCCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL MODELO EQUIVALENTE ..	28
2.1 Uso de Inducción para Cocción de Alimentos.....	28
2.1.1 Ventajas del Uso de Inducción para Cocción de Alimentos	30
2.1.2 Desventajas del Uso de Inducción para Cocción de Alimentos	31
2.2 Principios aplicados en las Cocinas de Inducción.....	32
2.2.1 Inducción Electromagnética	32
2.2.2 Efecto Piel	35

2.2.3	Transferencia de Calor	37
2.3	Descripción de los elementos constituyentes de una Cocina de Inducción	38
2.3.1	Fuente de alimentación.....	39
2.3.2	Rectificación.....	39
2.3.3	Inversor de alta frecuencia.....	40
2.3.4	Bobina.....	44
2.3.5	Olla	45
2.3.6	Sistema de control	45
2.4	Determinación del modelo equivalente para las cocinas de inducción.....	46
CAPÍTULO III.....		50
SIMULACIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LA MICRO RED FOTOVOLTAICA		50
3.1	Construcción de una función de transferencia para la cocina de inducción.	50
3.1.1	Verificación de la función de transferencia.....	54
3.2	Simulación de la curva de demanda en horarios específicos	59
3.2.1	Simulación de curvas de demanda para horarios específicos.....	61
3.2.2	Medición del consumo eléctrico de la cocina de inducción	64
3.3	Dimensionamiento y diseño de la micro red fotovoltaica.....	64
3.3.1	Dimensionamiento de la micro red fotovoltaica	65
3.3.2	Diseño de la micro red fotovoltaica.....	80
3.4	Modelo de operación para la energía producida por la micro red fotovoltaica	81
CAPÍTULO IV.....		84
HORAS PICO DE LA CURVA DE DEMANDA DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN Y FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA MICRO RED FOTOVOLTAICA		84
4.1	Análisis de las horas pico de la curva de demanda	84
4.1.1	Picos de demanda antes y después del uso de la cocina de inducción	86
4.1.2	Curva de demanda total para un hogar con cocina de inducción	87
4.2	Evaluación del desplazamiento de los picos de carga debido al uso de energía eléctrica producida por la micro red fotovoltaica.....	88
4.2.1	Modelización de la micro red fotovoltaica.....	89
4.2.2	Simulación de la operación de la operación de la micro red fotovoltaica.....	93
4.2.3	Curvas de demanda con desplazamiento de picos carga	108
4.3	Liberación de potencia en la red de distribución por uso de micro red fotovoltaica	111
4.4	Factibilidad de implementación de la micro red fotovoltaica propuesta	113

4.4.1	Inversión inicial de la micro red fotovoltaica y vida útil de los equipos.....	114
4.4.2	Ahorros generados por la micro red fotovoltaica	114
4.4.3	Operación y mantenimiento de la micro red fotovoltaica	115
4.4.4	Costo promedio del capital ponderado (WACC)	116
4.4.5	Valor Actual Neto (VAN)	117
4.4.6	Tasa interna de retorno (TIR)	118
4.4.7	Índice de beneficio/costo	118
4.4.8	Supuestos de la proyección económica	119
CONCLUSIONES		121
RECOMENDACIONES.....		124
Referencias.....		126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Comparación antes y después de someter al proceso de cocción a un pedazo de carne.....	4
Figura 1. 2 Mecanismos físicos para la transferencia de calor.	7
Figura 1. 3 Relación entre la energía doméstica y el nivel de desarrollo.	10
Figura 1. 4 Tipos de carbón.	12
Figura 1. 5 Cocina a GLP: a) Partes de la zona de cocción, b) Partes constitutivas de la cocina.	19
Figura 1. 6 Cocina eléctrica de resistencia: a) resistencia eléctrica de níquel-cromo, b) resistencia eléctrica cubierta con placa metálica.	21
Figura 1. 7 Cocina Vitrocerámica Halógena.	22
Figura 1. 8 Porcentaje de consumo de GLP en los sectores económicos de Ecuador	23
Figura 1. 9 Número de Barriles de GLP importados durante el año 2013	23
Figura 1. 10 Costos de Importaciones de GLP durante el año 2013	24
Figura 2. 1 Ley de Ampere.	34
Figura 2. 2 Ley de Lenz.	35
Figura 2. 3 Efecto Piel.	36
Figura 2. 4 Transferencia de calor en cocina de inducción.	38
Figura 2. 5 Configuración de una cocina de inducción.	38
Figura 2. 6 Configuración circuito rectificador.	39
Figura 2. 7 Inversor de Medio Puente.	41
Figura 2. 8 Inversor de Puente Completo.	41
Figura 2. 9 Inversor ZVS: a) Circuito básico, b) Circuito ZVS de media onda, c) Circuito ZVS de onda completa.....	42
Figura 2. 10 Inversor ZCS: a) Circuito básico, b) Circuito ZCS de media onda, c) Circuito ZCS de onda completa.	43
Figura 2. 11 Circuito equivalente del calentamiento por inducción.	46
Figura 2. 12 Modificación del circuito equivalente del calentamiento por inducción.	47
Figura 2. 13 Circuito Equivalente de la cocina de inducción.	47

Figura 3. 1 Aplicación de la Ley de voltaje de Kirchhoff al circuito equivalente de la cocina de inducción.	51
Figura 3. 2 Sistema para construcción de función de transferencia: a) Circuito RLC equivalente de la cocina de inducción, b) Circuito de la bobina de inducción.....	53
Figura 3. 3 Esquema del proceso experimental para obtención de datos de la cocina de inducción para la verificación de la función de transferencia.	55
Figura 3. 4 Ventana principal del System Identification Toolbox.....	56
Figura 3. 5 Señales de entrada y salida cargadas para la determinación de la función de transferencia.....	57
Figura 3. 6 Señales de entrada y salida definitivas cargadas para la determinación de la función de transferencia.....	58
Figura 3. 7 Resultado de la señal de estimación de la función de transferencia.....	59
Figura 3. 8 Bloque de la función de transferencia en Simulink para el cálculo de la potencia.....	61
Figura 3. 9 Interface desarrollada en GUI para simulación de uso de la cocina de inducción.....	62
Figura 3. 10 Curva de demanda simulada para un desayuno.	62
Figura 3. 11 Curva de demanda simulada para un almuerzo.....	63
Figura 3. 12 Curva de demanda simulada para la cena.	63
Figura 3. 13 Definición de una micro red de generación eléctrica.	65
Figura 3. 14 Curva diaria de demanda tipo para un hogar con cocina de inducción.....	68
Figura 3. 15 Separación entre arreglos de paneles fotovoltaicos.....	76
Figura 3. 16 Esquema de un sistema de generación fotovoltaica con configuración AC acoplado.	80
Figura 3. 17 Esquema de micro red fotovoltaica propuesta.	81
Figura 4. 1 Picos de la curva de demanda tipo de una cocina de inducción.....	85
Figura 4. 2 Curvas de demanda del consumo de potencia de la cocina de inducción y sin cocina de inducción.	87
Figura 4. 3 Curva de demanda total para un hogar con cocina de inducción.	88
Figura 4. 4 Modelación de micro red fotovoltaica y modelo de operación propuestos.....	93

Figura 4. 5 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril-Escenario 1.....	94
Figura 4. 6 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril-Escenario 1.....	95
Figura 4. 7 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril-Escenario 2.....	96
Figura 4. 8 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril-Escenario 2.....	96
Figura 4. 9 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes agosto-Escenario 1.....	97
Figura 4. 10 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto-Escenario 1.....	98
Figura 4. 11 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes agosto-Escenario2.....	99
Figura 4. 12 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto-Escenario 2.....	99
Figura 4. 13 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes abril-Escenario1.....	100
Figura 4. 14 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes abril-Escenario 1.....	101
Figura 4. 15 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes abril-Escenario 2.....	102
Figura 4. 16 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes abril-Escenario 1.....	102
Figura 4. 17 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes agosto-Escenario1.....	103
Figura 4. 18 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 1.....	103
Figura 4. 19 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 2.....	104

Figura 4. 20 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 2.....	105
Figura 4. 21 Comportamiento de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril.....	106
Figura 4. 22 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril.....	107
Figura 4. 23 Comportamiento de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo.....	107
Figura 4. 24 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto.....	108
Figura 4. 25 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-1 de simulación. Mes abril.....	109
Figura 4. 26 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-2 de simulación. Mes agosto.....	110
Figura 4. 27 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-3 de simulación. Mes abril.....	110
Figura 4. 28 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-4 de simulación. Mes agosto.....	111
Figura 4. 29 Porcentaje de potencia aportada por la red para la alimentación de la cocina de inducción. Simulaciones mes abril.....	112
Figura 4. 30 Porcentaje de potencia aportada por la red para la alimentación de la cocina de inducción. Simulaciones mes agosto.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. 1 Ventajas y desventajas de las técnicas de cocción por calor seco.	7
TABLA 1. 2 Ventajas y desventajas de las técnicas de cocción por calor húmedo.....	8
TABLA 1. 3 Ventajas y desventajas de cocinar con carbón.	12
TABLA 1. 4 Ventajas y desventajas de emplear kerosene	14
TABLA 1. 5 Propiedades del GLP.....	15
TABLA 1. 6 Ventajas y desventajas de emplear GLP.	16
TABLA 1. 7 Ventajas y desventajas de emplear Electricidad.	17
TABLA 1. 8 Otros Combustibles para Cocinar.	17
TABLA 1. 9 Características de Proyectos Hidroeléctricos.	25
TABLA 3. 1 Valores utilizados para la evaluación de la función de transferencia.	60
TABLA 3. 2 Clasificación de sistemas de generación distribuida.....	64
TABLA 3. 3 Radiación global promedio y energía mensual para la ciudad de Quito D.M.	66
TABLA 3. 4 Energía eléctrica requerida por cada comida en cocina de inducción.	68
TABLA 3. 5 Eficiencia de los equipos constitutivos de un sistema de generación fotovoltaico.	70
TABLA 3. 6 Datos técnicos inversor.	71
TABLA 3. 7 Datos técnicos del panel y datos meteorológicos.....	72
TABLA 3. 8 Conjunto de posibilidades para el arreglo de paneles en serie – paralelo.....	74
TABLA 3. 9 Arreglo elegido paneles en serie - paralelo.....	75
TABLA 3. 10 Comprobación del arreglo elegido paneles en serie – paralelo.....	76
TABLA 3. 11 Selección de conductores por tramos para el sistema fotovoltaico.....	79
TABLA 3. 12 Protecciones del sistema fotovoltaico.	79
TABLA 4. 1 Tiempos de operación a máxima potencia para una cocina de inducción.	86
TABLA 4. 2 Posibles horarios pico para un hogar con cocina de inducción.....	88
TABLA 4. 3 Presupuesto referencial para micro red fotovoltaica propuesta	114
TABLA 4. 4 Datos para el cálculo del costo del capital	117
TABLA 4. 5 Flujo económico para la evaluación de la implementación de la micro red fotovoltaica	120

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Propiedades de los materiales empleados para la fabricación de menaje.....	135
Anexo B : Radiación solar promedio mensual según datos tomados del TMY para el norte de Quito D.M.	136
Anexo C: Especificaciones técnicas del inversor.....	139
Anexo D: Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico.....	140
Anexo E: Especificaciones técnicas de la batería	141
Anexo F: Especificaciones técnicas del inversor – regulador.....	142
Anexo G: Especificaciones técnicas conductores de cobre tipo XHHW.....	143
Anexo H: Diagrama unifilar de la micro red fotovoltaica propuesta.	144
Anexo I: Diagrama de flujo del modelo de operación propuesto para la micro red fotovoltaica diseñada	145

GLOSARIO DE TÉRMINOS

°C	Grados Celsius
Bls GLP	Barriles de Gas Licuado de Petróleo
C	Capacitancia
CA	Corriente Alterna
CAICYT	Plan Concertado de Investigación Científica y Técnica
CC	Corriente Continua
di	Diferencial de corriente
dt	Diferencial de tiempo
E	Energía
FEM	Fuerza Electromotriz
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario
i	Corriente
I	Irradiancia
kcal	Kilocaloría
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kWp	Kilovatio pico
L	Inductancia
LTA	Longitud Total por Arreglo de paneles fotovoltaicos
MIPRO	Ministerio de Industrias y Productividad
MPPT	Punto de Máxima Potencia
MW	Megavatio
Npp	Número de paneles en paralelo
Nps	Número de paneles en serie
P	Potencia Activa
PWM	Modulación del Ancho de Pulso
R	Resistencia
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
T	Temperatura
THD	Distorsión Armónica Total
TIR	Tasa Interna de Retorno
TMY	Año Meteorológico Típico
V	Voltio
VAC	Voltaje en corriente alterna
VAN	Valor Actual Neto
VC	Voltaje en el condensador
VL	Voltaje en el inductor
VR	Voltaje en la resistencia
Vtot	Voltaje total
W	Vatio
WACC	Costo Promedio del Capital Ponderado

Modelización de una Micro Red Fotovoltaica aplicada a Equipos de Cocción por Inducción para el Reemplazo del GLP

Augusto Jonathan Riofrio Trujillo

ariofrio@est.ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana

Resumen— Debido al creciente uso de la electricidad, la cocción de alimentos ha sufrido grandes transformaciones, principalmente con respecto al combustible empleado, pasando de utilizar leña, carbón o derivados de combustibles fósiles hasta llegar al uso de la electricidad. En el caso de Ecuador, se ha decidido realizar una migración masiva de cocinas de GLP a cocinas eléctricas de inducción en los próximos tres años, gracias a las políticas de cambio de la Matriz Productiva y de diversificación de la Matriz Energética.

El presente trabajo presenta una alternativa para alimentar a estos equipos con electricidad generada a partir de una micro red fotovoltaica, la misma que posee la capacidad de almacenar energía y recurrir a la red para cubrir picos de demanda en horarios específicos, siguiendo las condiciones contempladas en un modelo de operación propuesto para este tipo de sistemas. Previo al diseño y dimensionamiento de la micro red fotovoltaica, se caracterizó la cocina eléctrica de inducción a través de un circuito equivalente y con ello se obtuvo una función de transferencia que permitió calcular el consumo de potencia activa de este equipo.

El modelamiento del sistema se lo hizo empleando la herramienta Simulink de Matlab, para un día tipo de los meses con mayor y menor recurso solar, considerando dos estados extremos del banco de baterías en el inicio del día. Los resultados muestran que el uso de generación distribuida aplicada a la alimentación de este equipo significaría para el usuario dejar de consumir entre un 57% y un 65% de la energía obtenida de la red de distribución, incluso para las peores condiciones climatológicas consideradas. Sin embargo, el análisis económico muestra que, con los niveles de costos actuales, la inversión en este tipo de instalaciones no es rentable en el corto plazo.

Índice de Términos—Circuito Equivalente, Cocción, Cocina eléctrica de inducción, Función de Transferencia, Gas Licuado de Petróleo (GLP), Generación Distribuida, Micro red Fotovoltaica, Modelo de operación.

Modelling of Photovoltaic Micro Grid applied to induction cooking equipment for Replacement of LPG

Augusto Jonathan Riofrio Trujillo
ariofrio@est.ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana

Abstract—Due to the increasing use of electricity, cooking food has developed major changes, mainly with respect to fuel use from firewood, coal or fossil fuel derivatives up to the use of electricity. In the case of Ecuador, the government has decided to run a campaign about massive migration from LPG based cookers to induction cookers during the next three years, thanks to the policies of changing the Productive Matrix and also the diversification of the Energy Matrix.

This work presents an alternative to feed these devices with electricity from a photovoltaic micro grid, which has the ability to store energy and use the grid energy to cover the peak demand at specific periods of time, following the established conditions in an operation model proposed for this kind of systems. Prior to the design and sizing of the photovoltaic micro grid, the electric induction cooker was characterized through an equivalent circuit and as a result a transfer function was obtained that allowed calculating the active power consumption of this equipment.

The modeling of this system was performed using the Matlab Simulink tool, for a typical day of the months with highest and lowest solar resource, considering two extreme states of the battery bank at the start of the day. The results show that the use of distributed generation power applied to this equipment could mean for the user to stop using between 57% and 65% of the grid energy, even for the worst weather conditions considered. However, the economic analysis shows that, with the current costs, investment in this kind of facility is not short-term profitable.

Keywords—Cooking, Distributed Generation, Electric Induction Cooker, Equivalent Circuit, Liquefied Petroleum Gas (LPG), Operating Model, Photovoltaic Micro grid, Transfer Function.

INTRODUCCIÓN

Los cambios económicos propiciados por decisiones gubernamentales tales como la eliminación parcial o total en el valor de los subsidios de los energéticos como el que existe en el Ecuador para el gas licuado de petróleo (GLP), producen cambios en los hábitos o costumbres de las poblaciones. Es por esto que millones de hogares optarán por modificar sus métodos de cocción, haciendo uso de equipos que empleen otros tipos de tecnologías entre las que se pueden mencionar a las cocinas eléctricas, las cocinas de inducción y los hornos eléctricos como algunos de los equipos más conocidos para la preparación de alimentos.

La inserción masiva de equipos como los antes mencionados, provocará un cambio radical sobre los sistemas eléctricos. Acorde a la realidad actual del sistema eléctrico, probablemente los sectores que más sufran las consecuencias serán los de transmisión y distribución debido al aumento de potencia. Estas son infraestructuras fundamentales para garantizar la continuidad y calidad del servicio eléctrico, que de no tomarse las previsiones necesarias de fortalecimiento y modernización, podrían sufrir daños en elementos vitales como conductores, protecciones e inclusive transformadores. Desde el punto de vista del sector residencial, este cambio llevará a un aumento en la potencia consumida lo cual impactará de manera directa sobre el consumo de energía eléctrica elevando de este modo la facturación mensual por este concepto.

El presente proyecto busca brindar una alternativa para cubrir la totalidad o en su defecto la mayor parte del consumo ocasionado por la cocina eléctrica de inducción, con energía proveniente de un sistema de generación fotovoltaica con capacidad de almacenamiento. Este sistema busca ayudar a mitigar los efectos ocasionados por el aumento de potencia en las redes de distribución así como también permitir a los abonados tener una mayor autonomía y gestión sobre sus consumos. Asimismo, este proyecto está alineado con lo estipulado en el Plan Nacional del Buen Vivir en el cual se habla de optimizar los recursos renovables en generación eléctrica, buscando mejorar la calidad de vida de la población y disminuyendo lo más posible los efectos negativos para el medio ambiente.

En la primera parte del presente trabajo se presenta la importancia de la cocción de los alimentos, así como un estado del arte de los combustibles empleados para este fin. El segundo capítulo describe el uso del fenómeno de la inducción aplicado a la cocción, además de describir a la cocina eléctrica de inducción. En el tercer capítulo se encuentran el detalle de la obtención de la función de transferencia, además del dimensionamiento y diseño del sistema fotovoltaico junto con el modelo de operación propuesto. . Finalmente, el capítulo cuatro presenta el análisis de los horarios picos provocados por la inclusión de estos equipos y los resultados de las simulaciones realizadas, junto con las conclusiones, las recomendaciones y los trabajos futuros.

CAPÍTULO I

PROCESOS DE COCCIÓN DE ALIMENTOS

En el presente capítulo se abordará el tema de los procesos de cocción aplicados en alimentos, empezando con una descripción de que consiste la cocción de alimentos con sus ventajas y desventajas para de esta manera entender la utilidad de los equipos de cocción que existen en la actualidad. Debido a que la cocción de alimentos es una de las actividades que requiere de una importante cantidad de recursos energéticos en el mundo, se ha realizado un recuento de los principales tipos de combustibles destinados para este fin. También se podrá encontrar una descripción de los sistemas que se emplean en la actualidad para cocinar, los mismos que se encuentran divididos principalmente en dos grupos como son: aquellos equipos que emplean al GLP y la electricidad.

Finalmente este capítulo presentará un estado del arte acerca de la situación del uso de GLP en Ecuador, lugar que ha sido tomado como caso de estudio para el desarrollo del presente trabajo debido a la implementación del denominado “Plan Nacional de Cocción Eficiente” que busca el reemplazo de cocinas convencionales de gas por cocinas eléctricas de inducción.

1.1 Cocción de Alimentos

El proceso de cocción puede ser definido como un tratamiento térmico al que son sometidos los alimentos independientemente de su origen (vegetal o animal) y que es el responsable de los fenómenos físico-químicos, bioquímicos y microbiológicos que son los encargados de determinar la calidad, digestibilidad, estabilidad además que permiten mejorar las características organolépticas del alimento una vez procesado [1],[2].

Someter a los alimentos a un proceso de cocción busca primordialmente: desarrollar las características sensoriales u organolépticas de los mismos, es decir resaltar su color, sabor, aroma, estructura, textura, etc., haciéndolo más apetitoso para los comensales, del mismo modo se busca alcanzar una estabilización microbiológica del producto así como también limitar los efectos de una cocción excesiva que básicamente son la degradación de las características organolépticas y mermas de los productos alimenticios.

Con el fin de ilustrar los fenómenos que se presentan en un alimento antes y después de ser sometido a cocción se presenta en la Figura 1.1[2], una comparación de este tipo para un

pedazo de carne.

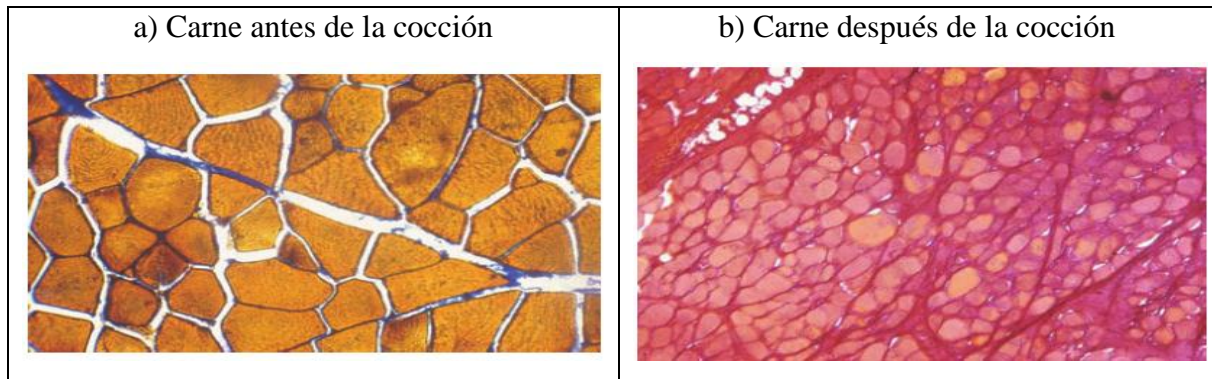


Figura 1. 1 Comparación antes y después de someter al proceso de cocción a un pedazo de carne.

Fuente: J. Lagares, “Proceso de fabricación de productos cárnicos cocidos de músculo entero V: Cocción,” pp. 161–169

1.1.1 Beneficios de la cocción de los alimentos.

Someter los alimentos a un proceso de cocción trae algunos aspectos favorables como lo es la modificación de su estructura, esto a su vez los ayuda a ser digeridos de una mejor manera por nuestros organismos, permitiendo de esta manera un mejor aprovechamiento de las vitaminas, proteínas y carbohidratos que estos contienen.

Este proceso ayuda también a eliminar los gérmenes patógenos como por ejemplo la salmonella y desactivar ingredientes tóxicos, además que favorece a una mejor absorción de los nutrientes que se encuentran concentrados en los alimentos por parte de los organismos humanos.

Permite mejorar el sabor de los alimentos además de esto al cocer alimentos como la carne o mariscos permite que su tiempo de ingesta sea mayor ya que crudos tienden a descomponerse rápidamente o pueden contener bacterias.

Cocer los alimentos ayuda a mejorar el metabolismo de las personas principalmente en estaciones en las cuales predomina el frío.

1.1.2 Desventajas de la cocción de alimentos

Las desventajas de cocer los alimentos se pueden analizar desde dos puntos de vista; el primero está ligado a la pérdida de cantidades de vitaminas y minerales de los alimentos ,lo cual tiene una relación directa con el proceso de cocción al que son sometidos los mismos y cuyo detalle se encuentra en la próxima sección de este capítulo, además la cocción de los alimentos también deteriora la absorción de nutrientes por parte de nuestro sistema

digestivo, mientras que el segundo aspecto a analizar es el tiempo que se requiere para la preparación de los alimentos así como que también será necesario disponer de una fuente de energía primaria que será transformada en calor el cual nos ayudará con la cocción de los alimentos, dependiendo de la tecnología que se emplee para realizar este cambio existirá un mayor o menor consumo energético al cual es necesario sumarle las pérdidas respectivas [1],[3] .

1.2 Procesos de Cocción

Los procesos de cocción aplicados a los alimentos presentan una relación directa con la transferencia de calor, fenómeno que se produce desde un cuerpo con mayor temperatura hacia uno de menor temperatura al entrar en contacto. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos como lo son:

Convección: constituye un fenómeno aplicable tanto a líquidos como a gases gracias a su composición atómica y molecular; además, la transferencia de calor por convección se sustenta tanto en el movimiento molecular aleatorio como en el movimiento volumétrico de un fluido [4],[5]. El movimiento global del gas o líquido está asociado con el hecho de que un gran número de moléculas se mueven colectivamente, de tal forma que esta acción acompañada de una variación de temperatura permite la transferencia de calor. Dicha transferencia se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y el movimiento global del fluido. Para el caso de la preparación de alimentos el fluido o sustancia se encuentra limitado por la superficie de la olla que lo contiene; la interacción de estos elementos cuando la superficie de la olla es calentada es la producción de una región en el fluido en la que la velocidad del movimiento molecular varía de cero a un valor superior en la superficie. Esta respuesta se ve acelerada si las temperaturas entre estos elementos difieren [6]. La convección puede ser clasificada de acuerdo a la naturaleza del flujo en:

Convección Forzada: Es aquella en la cual el flujo es generado por dispositivos externos como ventiladores o bombas.

Convección Libre: en este caso el flujo es provocado por fuerzas de empuje producidas por la diferencia de densidad debido a las variaciones de temperatura en el gas o fluido [7].

Conducción: el término conducción está directamente ligado al concepto de actividad

atómica y molecular, que son procesos en los cuales se sustenta este modo de transferencia de calor. La conducción es un fenómeno en el cual, la transferencia de energía de las moléculas más energéticas hacia las menos energéticas se lo realiza debido a las interacciones entre las mismas [5].

Durante el proceso físico de la conducción, las temperaturas más altas se encuentran directamente relacionadas con las energías moleculares más altas; estas moléculas al chocar de manera constante con las moléculas contiguas producen una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. El choque de las moléculas se debe al movimiento traslacional aleatorio, así como también con los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas. Una característica importante de este proceso es que al existir un gradiente de temperatura, la transferencia de calor se realizará de la molécula con mayor temperatura hacia la de menor temperatura, es decir de manera decreciente [6].

Para que el fenómeno de conducción se complete es necesario que exista un medio conductor que generalmente está fabricado con metales debido a su buena conductividad térmica; para el caso puntual de la cocción de alimentos este medio generalmente lo constituye el menaje [8].

Radiación: Constituye la energía emitida por cuerpo que se encuentra sometido a una cierta temperatura. Es producida de manera directa desde la fuente generadora de calor hacia el exterior en múltiples direcciones. Independientemente de la forma de la materia, la radiación es un fenómeno que se puede atribuir a modificaciones en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas que lo constituyen. La energía producida por la radiación es transportada por ondas electromagnéticas o fotones con una velocidad igual al de la luz motivo por el cual no requiere de un medio físico para su propagación por lo que puede realizarse en el vacío [9],[10].

La transferencia de calor por radiación se lleva a cabo cuando dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas intercambian calor para alcanzar un equilibrio térmico; esto se debe a que el cuerpo que tiene menor temperatura recibe la energía proveniente de otro que se encuentra a una temperatura mayor de tal forma que esta energía al ser absorbida por el cuerpo se convierte en calor [4], [6].

Los fenómenos antes explicados se encuentran representados en la Figura 1.2 [11].

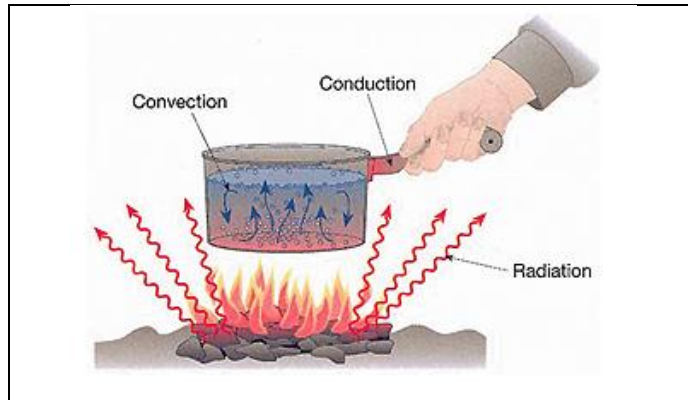


Figura 1. 2 Mecanismos físicos para la transferencia de calor.

Fuente: M. Cormick, “Northwestern Engineering,” 2014. [Online]. Available: <http://www.mech.northwestern.edu/courses/descriptions/377-heat-transfer.html>. [Accessed: 09-Sep-2014].

Una vez explicado los fenómenos por los cuales se realiza la transferencia de calor se puede dividir los procesos de cocción en tres grupos que se detallan a continuación.

1.2.1 Cocción por Calor Seco

Es un método en el cual se emplea el principio de la concentración debido que parte del agua del alimento se evapora y los elementos se concentran, en este proceso de cocción la transferencia de calor se lo hace a través de aire o grasa [12]. La temperatura de cocción es de 120°C a 150°C aunque también puede alcanzar valores de hasta 300°C durante cortos periodos de tiempo, es una técnica apropiada para alimentos con gran contenido de proteínas (carnes, pescado y mariscos).

Dentro de este proceso de cocción se puede incluir a técnicas como son: hornear, asar, gratinar, grillar y guisar. En la Tabla 1.1[1], se encuentran las ventajas y desventajas que presentan algunas de estas técnicas.

TABLA 1. 1 Ventajas y desventajas de las técnicas de cocción por calor seco.

Técnica	Ventajas	Desventajas
Asar	- En ocasiones no se agrega grasa a través de la cocción.	-Las vitaminas sensibles al calor se destruyen de manera parcial. -Cierta pérdida de agua/grasa con vitaminas cuando el caldo se reserva para una salsa. -Si se usa grasa, el contenido de esta aumenta. -Formación de acrilamida.
Grillar	-Se escurre la grasa propia del	-Se destruyen en forma parcial las

	alimento.	vitaminas sensibles al calor.
Hornear	-No hay pérdida de vitaminas y minerales en líquidos. -Las masas de harina y costras se vuelven ligeras y fáciles de digerir.	-Se destruye de manera parcial las vitaminas sensibles al calor. -Formación de acrilamida

Fuente: P. Traelmes and A. M. Villareal, “Métodos de cocción,” *Nutri Pro*, pp. 1–8, 2007.

1.2.2 Cocción por Calor Húmedo.

Es un método en el cual se añade algún líquido y los elementos solubles como vitaminas o minerales se disuelven en éste durante la cocción del alimento [13]. Es un proceso aplicado a la cocina que permite una mejor transferencia de calor debido a que se lo hace por medio del vapor del líquido añadido, lo que a su vez resulta en que la comida se cueza más rápido y el aprovechamiento de nutrientes sea mayor. La temperatura de cocción para este método puede variar entre 70°C a 120°C. Las técnicas más comunes aplicadas a este método son: hervir, cocción al vapor, escalfar y la técnica conocida como baño maría.

En la Tabla 1.2 [1], se encuentran las ventajas y desventajas que presentan algunas de estas técnicas.

TABLA 1. 2 *Ventajas y desventajas de las técnicas de cocción por calor húmedo.*

Técnica	Ventajas	Desventajas
Hervir	- No se necesita grasa/aceite.	- Gran pérdida de nutrientes por ósmosis, sobre todo vitaminas solubles en agua como ácido fólico, vitamina B1 y C
Escalfar	- No se necesita grasa/aceite.	- Gran pérdida de nutrientes
Cocción al vapor	-Método que ayuda a los nutrientes. -Mínima pérdida de vitaminas	

Fuente: P. Traelmes and A. M. Villareal, “Métodos de cocción,” *Nutri Pro*, pp. 1–8, 2007

1.2.3 Cocción por Calor Mixto o Combinado

Es un proceso que se lo realiza en dos etapas, la primera consiste en cocer al alimento utilizando cualquier técnica de cocción por calor seco y finalizar con una técnica de calor húmedo, una característica importante de este método es que aparte de la cocción del alimento se obtiene como subproducto una salsa o jugo. Para la aplicación de este proceso

existen tablas que permiten establecer los tiempos máximos de cocido que estarán en función de los equipos usados y las técnicas empleadas [14].

1.2.4 Cocción a Presión

Constituye una técnica en la cual se emplea un tipo de menaje especialmente diseñado, el cual se caracteriza por tener un cierre hermético y contar con una válvula para eliminar el vapor producido. La principal ventaja de este método es la reducción del tiempo empleado para cocinar un alimento, el mismo que se reduce aproximadamente a un tercera parte del tiempo empleado por cualquiera de los métodos anteriores, ayudes una técnica en la cual se puede conservar mayoritariamente las vitaminas y nutrientes de los alimentos [14].

La aplicación de este método está destinada a alimentos de consistencia dura (carnes, menestras, etc.) o cualquier alimento que se desee disminuir su tiempo de cocción.

1.2.5 Cocción por Microondas

Es una técnica en la cual el cocimiento se lo realiza empleando ondas electromagnéticas, en la aplicación de este método los alimentos son acompañados por líquidos que facilitan la absorción de la energía de las microondas con el fin transferir el calor al alimento. Se caracteriza por ser una técnica rápida para la cocción de los alimentos, los factores a considerar para determinar el tiempo de cocción requerido para determinar el tiempo necesario para cocinar son el contenido de agua del alimento, la densidad molecular y la penetración o la resistencia de las ondas electromagnéticas [13].

1.3 Energías primarias empleadas para la cocción de alimentos.

Considerando la importancia que presenta la alimentación en la supervivencia humana y que además muchos de los alimentos ingeridos necesitan ser sometidos a un proceso de preparación previo a su ingesta, muchos de los recursos energéticos son destinados para este fin alrededor del mundo.

Es así que según datos mostrados en [15], la energía empleada para cocinar representa cerca del noventa por ciento del consumo de energía a nivel residencial en países en vías de desarrollo.

En términos más globales se estima que más de tres mil millones de personas a nivel mundial dependen de combustibles sólidos para satisfacer su necesidad de energía útil y

poder emplearlas en actividades como cocinar, calentamiento de agua o calefacción [16]. El empleo de combustibles sólidos representa una fuente de contaminación ambiental bastante alta debido principalmente a los componentes tóxicos que resultan de su combustión a esto se le debe sumar que si el uso de este tipo de combustibles se lo hace en ambientes cerrados resultan ser nocivo para las personas que se desenvuelvan en este medio.

Desde el punto de vista de eficiencia energética el uso de combustibles sólidos no es la mejor opción para actividades como cocinar o calefacción debido a que durante el proceso de combustión mucha de la energía producida se pierde en el medio ambiente lo que a la larga se verá reflejado en la necesidad de emplear una mayor cantidad del combustible para cumplir con cualquiera de las dos actividades antes mencionadas.

Además el tipo de combustible empleado para cocción o calefacción está asociado al nivel de desarrollo económico y social de los países; es así que la energía empleada para usos domésticos basada en combustibles más limpios, eficientes y sobretodo que presenten facilidades de uso indicará un nivel mayor de desarrollo tal como se aprecia en la Figura 1.3. [16].

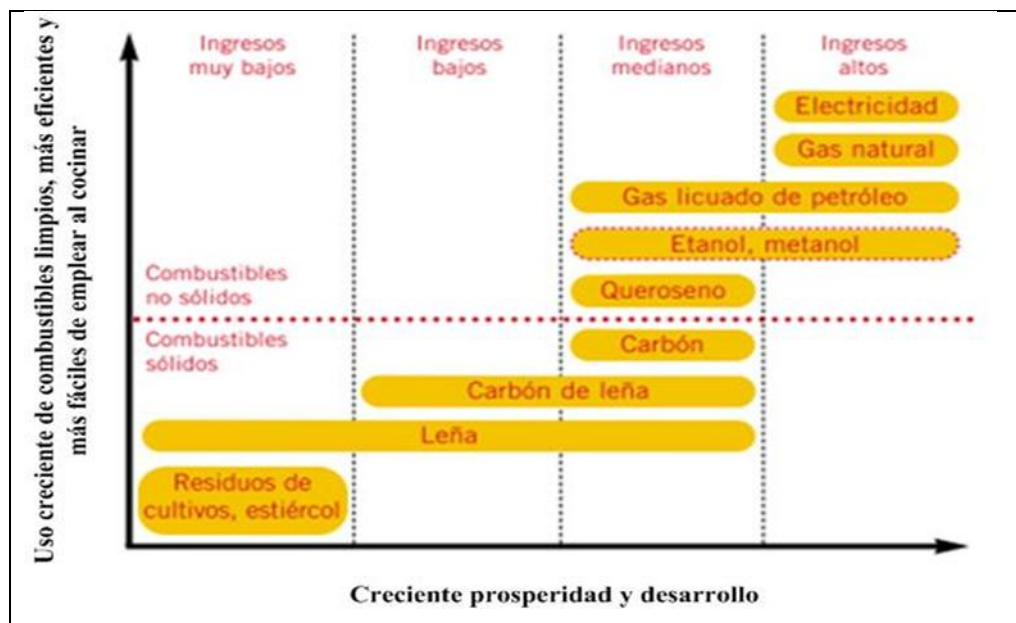


Figura 1. 3 Relación entre la energía doméstica y el nivel de desarrollo.

Fuente: E. Rehfuss and W. H. Organization, Energía doméstica y salud: combustibles para una vida mejor. 2007.

A continuación se detallan algunos de los combustibles empleados para cocinar y en

algunos casos para calefacción.

1.3.1 Carbón

El carbón corresponde uno de los combustibles fósiles de estado sólido más importantes, que se caracteriza por tener un alto nivel de carbono como también por su coloración negra y encontrarse bajo tierra. Es un material que resulta de los procesos de descomposición química de la vegetación prehistórica que se acumularon originalmente en pantanos y ciénagas.

Se estima que existen alrededor de 948.000 millones de toneladas en reservas de este combustible alrededor del mundo lo que da indicios para suponer que existirá la suficiente cantidad de este combustible para un periodo de tiempo cercana a los 190 años [17]. El carbón es un combustible que se puede encontrar en todos los continentes distribuido en setenta países, con las mayores reservas en los EE.UU. (26%), en segundo lugar se ubica Rusia (12%) seguido de China (11%) [18].

a) Tipos de Carbón

Los tipos de carbón vienen determinados por las propiedades físicas y químicas que a su vez son la respuesta a los cambios sufridos por el combustible al madurar desde la turba hasta la antracita proceso que recibe el nombre de carbonificación.

Carbones de Rango Bajo: dentro de este grupo está el lignito y los carbones subbituminosos que se caracterizan por tener una textura blanda así como una tonalidad mate. Presentan niveles de humedad altas, bajo contenido de carbono lo que se traduce en un poder energético bajo.

Carbones de Nivel Alto: suelen ser más duros y resistentes, presentan una tonalidad negra también se caracterizan por tener un contenido mayor de carbono, menor humedad por lo que la cantidad de energía es mayor [18]. Estos tipos de carbones se aprecian en la Figura 1.4 [17].

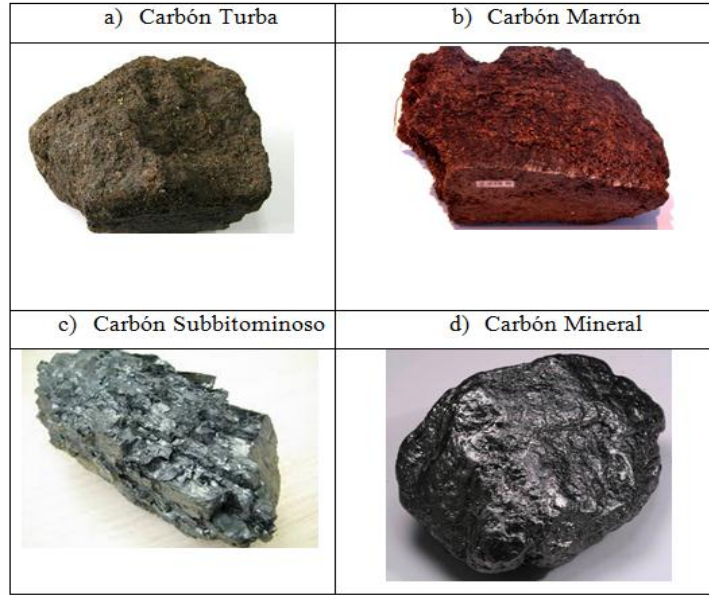


Figura 1. 4 Tipos de carbón.

Fuente: Carbunion, “¿ QUÉ ES EL CARBÓN ?” [Online]. Available: <http://www.carbunion.com/>. [Accessed: 09-Sep-2014].

b) Ventajas y desventajas de cocinar con carbón

En la Tabla 1.3 [18], se presentan algunas de las ventajas así como las desventajas de emplear al carbón como combustible para el cocimiento de alimentos.

TABLA 1. 3 *Ventajas y desventajas de cocinar con carbón.*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de adquisición. -Posee una gran rapidez de respuesta. -Presenta un elevado poder calorífico -Tiene un bajo porcentaje de materia inerte -Manejo fácil en relación con otros combustibles solidos 	<ul style="list-style-type: none"> -Genera gran cantidad de suciedad -Es necesario prestar más atención a los equipos con los cuales se va a cocinar -La posibilidad de presentarse incendios por un mal manejo del combustible. -Emisión de gases nocivos para el medioambiente y la salud

Fuente: P. Gerling and H. Rempel, “Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002,” ... *Länderstudien, H. XXVIII, ...*, 2003.

c) Consumo y Emisiones

Durante la combustión del carbón se emiten sustancias como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos de mercurio los cuales son característicos de una combustión incompleta principalmente debido a la falta de oxígeno. Estas emisiones son las que hacen

que el uso de carbón para actividades cotidianas como cocinar o calefacción nos sea tan conveniente.

El carbón es el combustible sólido que presenta la mayor perspectiva de largo uso debido a la cantidad de yacimientos existentes, sin embargo el uso continuo de este combustible como fuente principal de energía para hogares en los países en desarrollo obliga a los mismos a implementar normas o reglamentos enfocados en reducir los gases de efecto invernadero como planes de salud que prevengas las enfermedades respiratorias.

1.3.2 Kerosene

El kerosene es un derivado del petróleo crudo compuesto por una mezcla de hidrocarburos, se encuentra en estado líquido y posee una alta densidad de energía, el color del kerosene varia de incoloro a negro.

Por mucho tiempo ha sido empleado para la iluminación de hogares, en sistemas de calefacción, en equipos de cocción de alimentos además se lo suele utilizar como combustibles en motores de reacción y como disolvente.

En los últimos años el consumo de kerosene se ha visto disminuido y se ha ido reduciendo solo a las zonas rurales debido al crecimiento urbanístico de las ciudades, los planes de electrificación; así como también el uso de energías renovables no convencionales. La potencia calorífica del kerosene varía entre los 11,000 a 11,700 kcal/kg.

a) Composición

Al ser un compuesto derivado del petróleo, el kerosene está formado en su mayoría por carbono e hidrógeno, formando moléculas de hasta 50 átomos de carbono las cuales presentan pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados, los cuales no se encuentran en estado libre sino formando parte de las moléculas de los hidrocarburos. La composición aproximada que presenta este combustible corresponde al rango de C12-C16, se caracteriza por hervir normalmente entre el rango de 150°C a 315°C. Sus propiedades difieren según la zona substancialmente en composición, sulfuro, ciclo parafinas y contenido aromático. Por ejemplo, el kerosene utilizado para la iluminación es un destilado inmediato de crudos parafinados o mezclados y destilados tratados con solventes de los crudos aromáticos.

El kerosene está compuesto por un 84% de carbono y el 16% de hidrógeno, es importante

tener en cuenta que la proporción de azufre no debe exceder el 0.125% para de esta forma limitar la emisión de gases de efecto invernadero [19].

b) Ventajas y desventajas de emplear kerosene

Estas se encuentran en la Tabla 1.4 [19]:

TABLA 1. 4 *Ventajas y desventajas de emplear kerosene*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Es un combustible limpio comparado con otros hidrocarburos. -Ayuda a tener una cocción más rápida si se emplea en estufas apropiadas con buena presión. -Facilidad para controlar el calor. -Facilidad de uso. -Se lo puede comprar en pequeñas cantidades lo que presenta mayor asequibilidad. -Almacenamiento y transporte más seguros. 	<ul style="list-style-type: none"> -Produce altos niveles de contaminantes al emplearlo en equipos inapropiados. - Tiene un olor desagradable y en algunas ocasiones este olor es transportado hacia los alimentos. -Altamente inflamable. -Es confundido con otros líquidos debido a su forma de almacenamiento (botellas plásticas) y en ocasiones suele ser ingerido. -Es un recurso no renovable.

Fuente:R. Energy, “KEROSENE AND LIQUID PETROLEUM GAS (LPG),” *Practical Action Technology challenging poverty*, 1994.

1.3.3 Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Constituye un combustible de estado gaseoso que resulta del proceso de refinación del petróleo o en plantas recuperadoras de Gas Natural, está compuesto principalmente de propano y butano, elementos que a temperatura y presión ambientales se encuentran en estado gaseoso pero que se convierten en líquido al ser comprimidos lo que da origen al nombre de este compuesto.

El consumo del GLP ha crecido de manera considerable desde la última década del siglo anterior, entre los países con mayor consumo de este hidrocarburo se encuentran EE.UU. con cerca de 56 millones de toneladas al año, seguido de Japón con 20 millones de toneladas anuales y China con 13 millones de toneladas [20].

El consumo doméstico es la principal área de aplicación de este combustible con el 49% de uso a nivel mundial, seguido de la industria con el 13% y el transporte con un 7% que constituyen los otros sectores con mayor uso representativo de este combustible.

a) *Propiedades*

Se trata de un gas inodoro, al cual se le añade agentes odorantes con el fin de lograr darle un olor fuerte que permita su detección en el caso de fugas. Es inflamable al entrar en contacto con el oxígeno y aunque no es tóxico la inhalación de grandes cantidades de este gas puede provocar asfixia [21].

La densidad y presión del vapor del GLP varían según la composición que este contenga. En estado gaseoso se caracteriza por tener un mayor peso al del aire esto se debe a que tanto su densidad como su peso específico son mayores a los del aire.

El GLP en estado líquido es más liviano y menos viscoso que el agua, por lo que su manejo en este estado debe ser cuidadoso ya que puede ingresar a través de poros por donde ni el agua o kerosene pueden hacerlo. Otra consideración importante respecto al GLP es su poder calorífico superior el cual presenta una variación dependiendo de la cantidad de propano y butano por la que esté formado por lo general presenta un valor de 13,005 kcal/kg [22]. Estas y otras propiedades del GLP se encuentran resumidas en la Tabla 1.5 [21], que se encuentra a continuación.

TABLA 1. 5 Propiedades del GLP

	Propano Comercial	Butano Comercial
Presión Absoluta en [kPa] a:		
20°C	1,000	220
40°C	1,570	360
45°C	1,760	385
55°C	2,170	580
Peso Específico	0.504	0.582
Punto de ebullición a 1 atm de presión [°C]	-42	-9
Peso por metro cúbico de líquido a 15.56°C [kg]	504	582
Calor Específico del líquido a 15.56°C [kJ/kg]	1,464	1,276
Metros cúbicos de vapor por litro de líquido a 15.56°C	0.271	0.235
Metros cúbicos de vapor por kilogramo de líquido a 15.56°C	0.539	0.410
Peso específico del vapor a 15.56°C (aire = 1)	1.50	2.01

Temperatura de ignición en aire, °C	493 - 549	482 -538
Poder calorífico superior [kcal/kg]	13,005	

Fuente:B. Liang, S. Balasubramanian, B. Wang, A. Yang, D. Kennedy, V. Le, J. Legaspi, and J. Southern, "LPG characterization and production quantification for oil and gas reservoirs," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 244–252, Nov. 2010.

b) *Ventajas y desventajas de emplear GLP*

La Tabla 1.6 concentra las ventajas y desventajas de usar este hidrocarburo.

TABLA 1. 6 *Ventajas y desventajas de emplear GLP.*

Ventajas	Desventajas
- Es un combustible limpio comparado con otros hidrocarburos. -Libera menos contaminantes durante el proceso de combustión. -Fácil de encender. -Proporciona calor instantáneo. -Rapidez de cocción. -Facilidad de almacenamiento y transporte.	-Combustible costoso en comparación con algunos combustibles sólidos como la leña. -El suministro del combustible puede ser poco fiable. -Altamente inflamable. -Es un recurso no renovable. -Escasez en zonas rurales.

Fuente: Autor

1.3.4 Electricidad

La electricidad es un conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia de flujos y cargas eléctricas, constituye un servicio básico al alcance de mayoría de personas en la actualidad.

La electricidad es una forma de energía útil muy versátil que en la actualidad es usada en muchas aplicaciones como: transporte, cocción de alimentos, climatización, iluminación, sistemas de audio, video y computacionales.

Esta forma de energía se ha ido masificando debido a los avances en las partes constitutivas de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), los sistemas de Generación de electricidad se han visto fortalecidos debido a la inclusión de nuevas fuentes de energía como las renovables (fotovoltaica, eólica, mareomotriz, hidráulica, etc.) y también a la mejora de la tecnología en las maquinas térmicas empleadas para este fin, tanto en los sistemas de transmisión como en los de distribución se han implementado equipos y estructuras con el fin de garantizar la continuidad del servicio eléctrico.

En lo referente a la uso de la electricidad como energía primaria para cocinar, se la viene

empleando desde el siglo XIX cuando aparecieron los primeros modelos de estos equipos que significaron un avance importante para las personas de la época debido a que incluían dispositivos como termostatos para el control de la temperatura a la cual se cocían los alimentos [23].

a) *Ventajas y desventajas de emplear Electricidad*

Las ventajas y desventajas, de esta energía se muestran en la Tabla 1.7.

TABLA 1. 7 *Ventajas y desventajas de emplear Electricidad.*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Rápido funcionamiento. -Fácil de usar. -Proporciona calor instantáneo. -Rapidez de cocción. -No existe peligro de incendio por focos de calor. -Permite controlar el tiempo de funcionamiento de equipos 	<ul style="list-style-type: none"> -Cortes de energía -Inversión en sistemas de transmisión y distribución -Desperdicios energéticos en conductores. -Consumos parásitos

Fuente: Autor

1.3.5 Otros Combustibles

Aparte de los combustibles anteriormente descritos los cuales son los mayoritariamente utilizados, existen otros cuyo uso se ha visto disminuido o como en el caso de la energía solar están perfeccionándose y su empleo no es del todo generalizado en sectores urbanos. A continuación en la Tabla 1.8 [24], se presenta una tabla con algunos de estos combustibles y sus características:

TABLA 1. 8 *Otros Combustibles para Cocinar.*

Combustible	Características
Leña	<p>La madera es uno de los mejores recursos como combustible pero en muchos lugares es escasa.</p> <p>Para conservar estos recursos valiosos del bosque y reducir el humo, utilice leña seca, cortada en pequeños pedazos</p> <p>Es uno de los combustibles más empleadas en las regiones rurales de los países en desarrollo razón por la cual es política en estas naciones erradicar su uso.</p>
	En muchos lugares se utilizan como combustible los residuos secos de las

Biomasa	<p>cosechas, tales como cáscaras de arroz o maíz, así como las cortezas de algunos frutos.</p> <p>Cuando estos materiales se queman sin procesarlos producen mucho humo y pueden ser un peligro para la salud.</p> <p>Al someter estos a un proceso previo en el cual se modifica su forma a una más compacta se logra que ardan más tiempo y produzcan menos contaminantes.</p> <p>La biomasa puede ser muy útil en lugares donde el combustible es escaso y la gente quiere limitar el uso del carbón y el carbón vegetal.</p>
Biogás	<p>Constituye un gas natural compuesto principalmente de metano, que es una fuente valiosa de energía.</p> <p>Se produce cuando se convierte la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos, animales y de las plantas en energía útil.</p> <p>Transforma los desechos en un recurso menos dañino para el medio ambiente y para la salud de la comunidad que otros combustibles.</p>
Luz Solar	<p>El calor emitido por el sol puede también utilizarse para cocinar, empleando equipos destinados para este fin como lo son en estufas solares.</p> <p>Las estufas solares son más lentas en comparación con aquellas que emplean combustibles sólidos.</p> <p>En algunos lugares el principal uso que se da a las cocinas solares es purificar el agua para beber</p>

Fuente:J. Conant and P. Fadem, “A Community Guide to Environmental Health,” in *A Community Guide to Environmental Health*, 2011, pp. 393–394.

1.4 Equipos actuales para sistemas de cocción en hogares

Para el lugar del caso de estudio es importante manifestar que aparte de los equipos que emplean GLP como combustible principal, existen también equipos que funcionan con electricidad razón por la cual se presentan una descripción de estos dispositivos en el presente inciso.

1.4.1 Cocinas de GLP

Constituyen los equipos más empleados para la cocción de alimentos por los profesionales de la gastronomía y la población de los países en vías de desarrollo [15], [25], son equipos que se caracterizan por presentar variados diseños y modelos desde aquellos que cuentan con cuatro, cinco o seis hornillas del tipo encimera hasta dispositivos más completos que cuentan con horno incluido.

En Ecuador que constituye el lugar del caso de estudio un aspecto que ha contribuido al uso

masivo de estos equipos es el crecimiento de la industria nacional que ha mejorado sus procesos productivos y con ello la calidad de este tipo de productos además de las políticas gubernamentales que fomentan la inclusión de componentes nacionales en equipos ensamblados en el país.

Las cocinas que emplean al GLP basan su funcionamiento en la combustión de este combustible, para ello estos equipos cuentan con quemadores en cada una de las hornillas los cuales son los encargados de controlar la combustión [26].

Para que el fenómeno de la combustión sea posible una determinada cantidad del GLP debe mezclarse con el oxígeno que se encuentra en el aire y es por esta razón que las cocinas cuentan con perrillas o mandos que permiten regular la cantidad de gas y oxígeno que se combinarán durante la combustión [27]. Un elemento que es de suma importancia para completar este proceso es la llama propiamente dicha que es generada empleando fósforos o encendedores, aunque en los modelos más sofisticados las propias cocinas cuentan ya con sistemas de encendido propios. Finalmente, este tipo de cocinas cuentan con tapas sobre cada uno de los quemadores las mismas que se caracterizan por tener orificios en su diámetro exterior por donde circula el GLP para su combustión; esto se lo puede apreciar en la Figura 1.5.

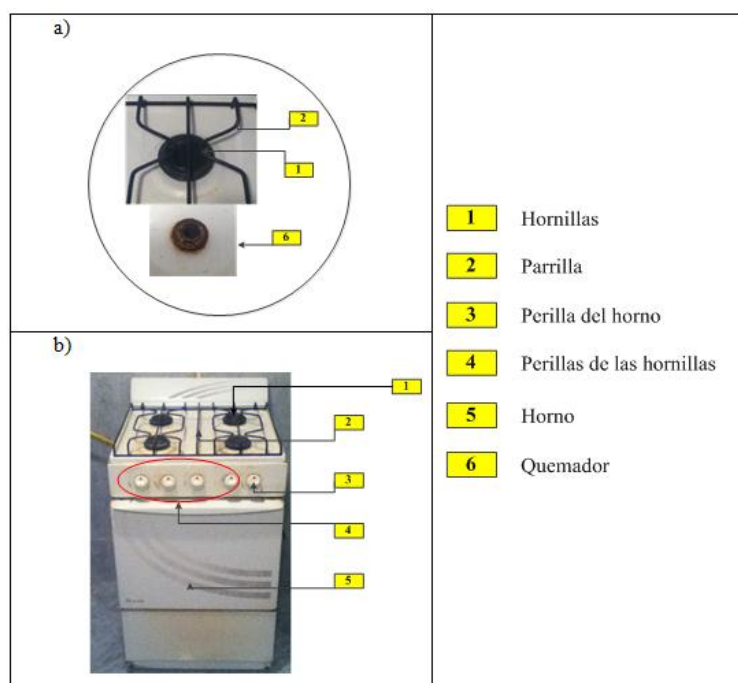


Figura 1. 5 Cocina a GLP: a) Partes de la zona de cocción, b) Partes constitutivas de la cocina.

Fuente: Autor

1.4.2 Cocinas Eléctricas de Resistencia

Son equipos que surgieron como una alternativa a las cocinas convencionales de GLP, para el lugar del caso de estudio son dispositivos asociados a sectores con un poder adquisitivo mayor según los datos presentados en [28].

En el aspecto constructivo presentan una configuración muy parecida a las cocinas de GLP, es decir de cuatro a seis hornillas con o sin horno, la regulación de la temperatura se lo puede hacer mediante perillas o mandos digitales en equipos más sofisticados. Estos equipos pueden funcionar con alimentación de 120 V o 220 V.

Estos equipos basan su funcionamiento en emplear la electricidad para la producción de calor, esto es posible gracias al efecto Joule cuyo principio se basa en la liberación de calor producida por un conductor al momento que empieza a circular una corriente eléctrica por él, esta transferencia de calor se debe a la oposición al flujo de la corriente que presenta este elemento (resistencia) [23].

Las resistencias empleados en cada hornilla son arrollamientos concéntricos de diferentes diámetros, el material empleado para este tipo de resistencias son la aleación níquel-cromo cubiertas por un material cerámico en unas casos o placas metálicas en otros.

En este tipo de equipos la potencia total de consumo está determinada por la suma de cada uno de los consumos individuales de cada hornilla, el cual a su vez tiende dependencia directa con el diámetro de la hornilla, el valor de la resistencia de aislamiento y la eficiencia con la cual se realice la transferencia de calor al menaje. La figura 1.6 nos muestra una cocina eléctrica de resistencia.



Figura 1. 6 Cocina eléctrica de resistencia: a) resistencia eléctrica de níquel-cromo, b) resistencia eléctrica cubierta con placa metálica.

Fuente: Autor

1.4.3 Cocinas Eléctricas Vitrocerámica

Son equipos que tienen presencia en el mercado desde fines de los años ochenta del siglo pasado su principal característica es que las hornillas se encuentran debajo de un vidrio cerámico por lo que la apariencia de estos dispositivos es sofisticada y moderna.

La tecnología aplicada en estos equipos de cocción es notablemente mejor en comparación con la de las cocinas convencionales tanto de GLP como en las eléctricas de resistencia, un claro ejemplo de esto son los mandos táctiles con diferentes niveles de potencia que estas cocinas tienen, además de funciones como las de temporizadores, alarmas, indicadores de temperatura y bloqueos de las zonas de cocción. Se caracterizan también porque existen equipos desde una zona de calentamiento hasta seis dependiendo del fabricante o las necesidades de los usuarios.

Este tipo de cocinas presentan tres tipos de tecnologías para realizar el calentamiento como son: resistencias eléctricas muy parecidas a las empleadas en las cocinas antes descritas, lámparas de halógeno y sistemas de inducción. En este apartado se explicará un poco más acerca de las cocinas eléctricas que funcionan con lámparas halógenas debido a que el sistema de resistencia eléctrica ya fue explicado y los sistemas por inducción serán abordados en el capítulo dos del presente trabajo.

Cocina Vitrocerámica Halógena: es un equipo cuyo principio de funcionamiento es

similar al de un foco o lámpara halógena, es decir cuentan con un filamento de tungsteno el cual se encuentra contenido dentro de un gas inerte con ciertas cantidades de halógeno de tal manera que cuando empieza a circular una corriente eléctrica se incrementa la temperatura del filamento hasta el punto que llega a emitir ondas luminosas, debido a que en esta clase de equipos no es tan importante la generación de luminosidad el grosor del filamento es mayor lo que permite una mayor liberación de calor.

Para estos equipos debido a las temperaturas de funcionamiento se sustituye el vidrio cerámico por cristal de cuarzo hermético como recubrimiento, el cual cumple con dos funciones como son encerrar al gas halógeno y soportar el menaje. La Figura 1.7 [29], ilustra una cocina eléctrica halógena.

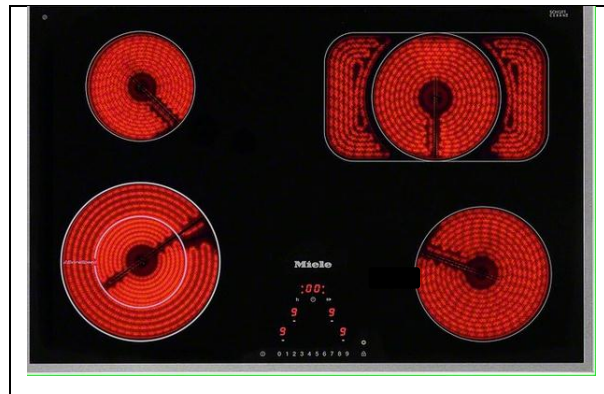


Figura 1. 7 Cocina Vitrocerámica Halógena.

Fuente: Teka, “Teka,” 2014. [Online]. Available: <http://www.teka.com/products/> [Accessed: 28-Aug-2014].

1.5 Aplicaciones del Gas Licuado de Petróleo (GLP) para el Caso de Estudio

El lugar para el caso de estudio del presente trabajo es Ecuador, país situado en América del Sur con una población aproximada a los catorce millones de personas, dentro del campo energético del país, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) tiene presencia en la mayoría de los sectores económicos, siendo el sector residencial el mayor usuario de este recurso. En la Figura 1.8 [30], se puede apreciar el porcentaje de consumo de GLP en cada uno de los sectores mercantiles del país.

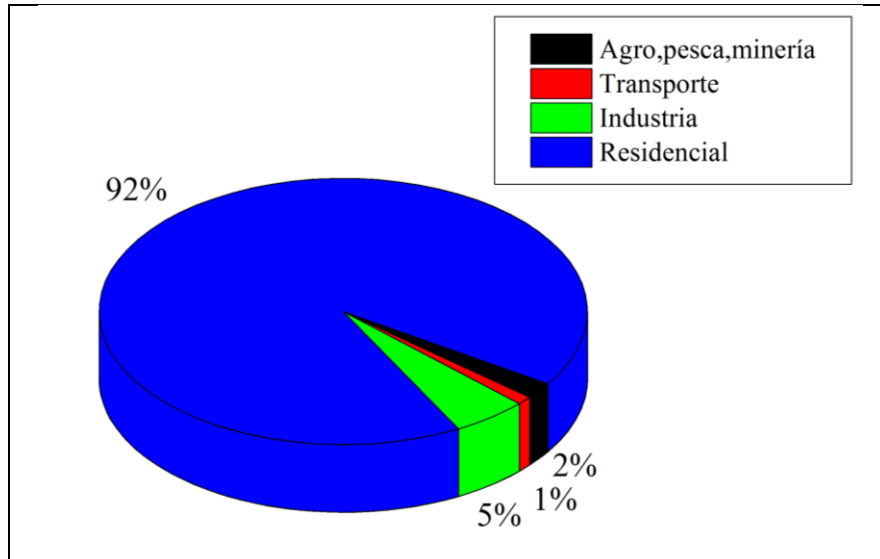


Figura 1. 8 Porcentaje de consumo de GLP en los sectores económicos de Ecuador
Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, “Balance Energético Nacional 2013,” Quito, 2013.

Del consumo total de GLP se tiene que el 76% de este hidrocarburo es importado y sólo el 24% es de producción local [30]. Durante el año 2014, hasta el mes de noviembre Ecuador importó 9 545,376 barriles de GLP (Bls GLP) lo que significó una inversión de US\$ 644 539,946.31 para el país [31].

En las Figuras 1.9 y 1.10 [31], respectivamente, se muestran las cantidades y los costos mensuales por concepto de importación de Gas Licuado de Petróleo.

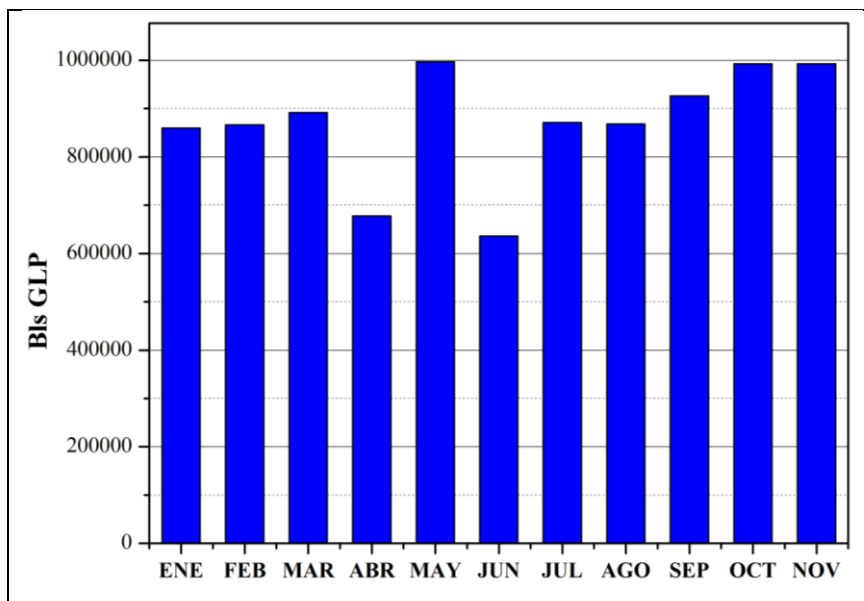


Figura 1. 9 Número de Barriles de GLP importados durante el año 2014
Fuente: PETROECUADOR, “Informe cifras petroleras Período Enero - Noviembre 2014,” Quito, 2015

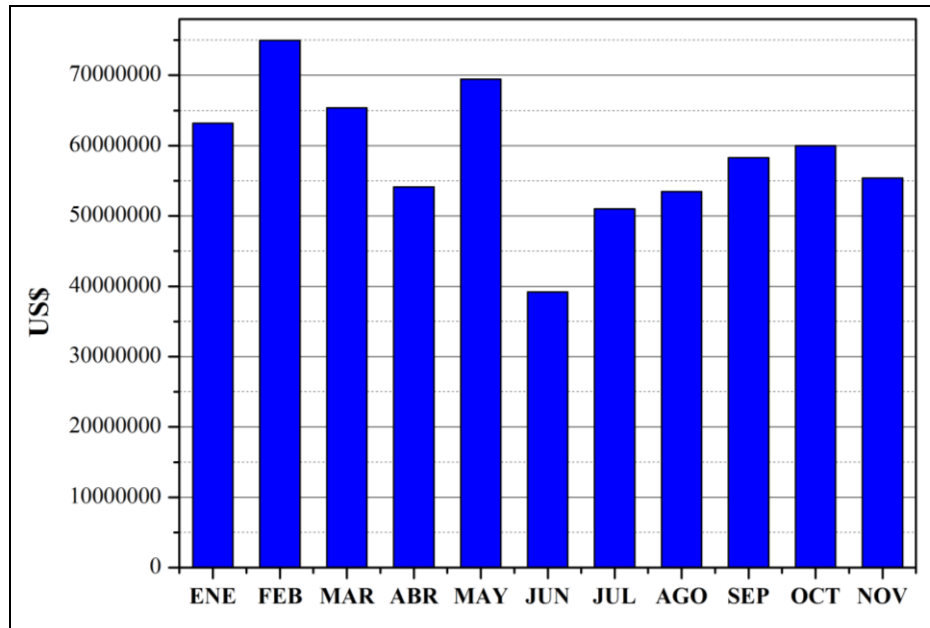


Figura 1. 10 Costos de Importaciones de GLP durante el año 2014

Fuente: PETROECUADOR, “Informe cifras petroleras Período Enero - Noviembre 2014,” Quito, 2015

A su vez dentro del sector residencial, según datos recopilados en el censo de Población y Vivienda del año 2010 el 91% de los hogares ecuatorianos emplean al GLP como principal combustible para la cocción de alimentos [28]. La razón primordial para este uso mayoritario es el subsidio en el valor de venta al público de los cilindros de gas de 15 kg. que son los que están destinados al uso residencial.

El precio actual del cilindro de GLP para uso doméstico con el subsidio estatal es de \$ 1.60 USD, considerando el dato anterior, Ecuador gasta una media de entre \$ 600 USD y \$ 800 USD millones anuales por concepto de este subsidio [32]. Constituyéndose de esta manera en un rubro considerable dentro del Presupuesto Estatal y considerando que el crecimiento de la demanda está cerca del 2.4% anual este rubro tenderá a ser mayor en los próximos años [33].

1.5.1 Plan Nacional de Cocción Eficiente

Con los datos de consumo de GLP presentados para el lugar del caso de estudio además de las opciones de equipos que existen en la actualidad para la cocción de alimentos, el Gobierno de la República del Ecuador ha decidido la implementación del denominado

“Plan Nacional de Cocción Eficiente” cuyo objetivo primordial es sustituir el consumo de GLP por electricidad como fuente principal para la cocción de alimentos en los hogares ecuatorianos. Para esto se reemplazará las cocinas convencionales de gas por cocinas de mayor eficiencia y que funcionan con electricidad como son las cocinas de inducción. Con esto se aspira reducir la inversión en importación del gas licuado de petróleo.

Este plan está alineado hacia el cambio de matriz energética que se viene desarrollando en Ecuador, donde se busca tener un abastecimiento principalmente proveniente de fuentes de energías renovables. La energía hidráulica se constituirá en la fuente que más aporte brinde al sistema eléctrico nacional con una potencia aproximada de 2900 MW gracias a los proyectos: Paute Sopladora, Toachi-Pilaton, Manduriacu, Delsitanisagua, Quijos, Minas San Francisco y Coca Codo Sinclair, las características de cada una de estas centrales así como la potencia que aportarán cada una al Sistema Nacional Interconectado se encuentra resumida en la Tabla 1.9.

También se tendrá un aporte de otro tipo de proyectos con generación fotovoltaica con un estimado de 150 MW, biomasa y biogás con una potencia cercana a 101.3 MW y eólica con alrededor de 20 MW, cuyos permisos habilitantes han sido otorgados ya por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) [34].

TABLA 1. 9 *Características de Proyectos Hidroeléctricos.*

Central	Ubicación	Potencia [MW]	Energía Media [GWh/año]	Entrada en Operación
Paute – Sopladora	Morona Santiago y Azuay	487,8	2.770	Abril de 2015
Toachi - Pilaton	Sto. Domingo de los Tsáchilas, Pichincha, Cotopaxi	253	1.100	Febrero de 2015
Manduriaco	Pichincha	62	356	2014
Delsintanisagua	Zamora Chinchipe	116	904	2016
Quijos	Napo	50	355	2015
Minas – San Francisco	El Oro y Azuay	276	1.321	2015
Coca Codo Sinclair	Napo y Sucumbíos	1500	8.743	Febrero de 2016

Fuente: Autor

Para la aplicación de este proyecto de forma exitosa el gobierno ecuatoriano ha considerado cuatro puntos fundamentales como son:

Adecuar al sistema eléctrico con el fin de cubrir la demanda generada por las cocinas: debido al aumento de demanda generando por la inclusión masiva de cocinas de inducción se producirá picos en la curva de demanda del Sistema Nacional Interconectado, particularmente en los horarios de desayuno, almuerzo y merienda. Las adecuaciones estarán enfocadas mayoritariamente a los equipos de los sistemas de distribución como son transformadores y conductores.

En este punto también se contempla el cambio de medidores monofásicos por bifásicos en los domicilios, así como el cambio y/o reforzamiento de acometidas debido a que las cocinas a implementarse funcionaran con un voltaje de 220 V y la instalación de circuitos.

Definir tarifas para el consumo eléctrico y el GLP: para que la inclusión de cocinas de inducción sea viable en Ecuador debe buscarse que el hecho de cocinar con electricidad sea tan conveniente como lo es el usar el GLP debido a su precio subsidiado, es por esta razón que este plan contempla un subsidio de los primeros 100 kWh consumidos en los hogares, debido a que el Gas Licuado de Petróleo en el sector residencial no es solo empleado en cocción sino también en sistemas para calentamiento de agua, el valor de la energía subsidiada se repartirá en 80 kWh para preparación de alimentos (cocinas) y 20 kWh para calentamiento de agua (duchas eléctricas).

Según datos consultados en [33] el precio por kWh para el sector residencial que garantizará un verdadero incentivo y mantendrá un gasto similar al del consumo de GLP es de 3 centavos USD/kWh. Si se considera que la tarifa actual por kWh es de 8.24 centavos USD/kWh, el estado ecuatoriano subsidiará un 63.59 % de este valor. La ventaja de subsidiar la electricidad en lugar del Gas Licuado de Petróleo será que el dinero invertido para este fin se quedará dentro del territorio ecuatoriano y llegará directamente al consumidor. Finalmente el precio por cilindro de GLP tendrá que incrementarse hasta alcanzar el valor real de este hidrocarburo en el mercado internacional.

Generar un Mercado de cocinas eléctricas de Inducción: los productores de electrodomésticos en coordinación con el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO) serán los encargados de generar una oferta a nivel nacional con gran variedad de

cocinas de inducción a precios accesibles por la población. Junto con la fabricación de cocinas de inducción también se fomentará el crecimiento de la industria de producción de menaje debido a que las cocinas de inducción para su correcto funcionamiento necesitan que este sea de material ferromagnético.

Generar condiciones para que las familias adopten esta tecnología de inducción: en este punto el plan contempla transmitir a los ciudadanos, las ventajas que implica el hecho de emplear la electricidad como energía para cocinar y sobretodo familiarizar a la gente con los nuevos equipos de cocción, debido a que el cocinar con GLP es una costumbre muy fuerte en Ecuador. También se contempla la puesta en marcha de planes que permitan a los usuarios cambiar las cocinas convencionales por cocinas de inducción brindando facilidades de pago a través de las empresas Distribuidoras de energía.

CAPÍTULO II

COCINAS DE INDUCCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL MODELO EQUIVALENTE

En este capítulo se presenta información relevante acerca de las cocinas eléctricas de inducción, la misma que para su mejor presentación ha sido dividida en cuatro apartados.

En el primero de ellos se dará a conocer aspectos importantes de la adopción de esta tecnología para cocinar los alimentos, es así que se empezará hablando de la historia de este electrodoméstico así como también de las ventajas y desventajas que implica su uso. Seguido de esto se podrá encontrar una explicación de los principios físicos que han hecho posible el uso de los fenómenos electromagnéticos para la transferencia de calor por inducción, que no solo es aplicada en este tipo de electrodomésticos sino también en aplicaciones de uso industrial como por ejemplo los grandes hornos de fundición en las acereras. En el tercer apartado se detallan los elementos por los cuales está compuesta la cocina, para una mejor explicación de estos se los ha dividido en subsistemas. Los mismos cumplen una función específica en la operación total de este equipo.

En el último apartado de este capítulo, se ha definido un circuito equivalente para el calentamiento por inducción. Para la determinación de este circuito se ha considerado las características de funcionamiento propias de la cocina de inducción y con esto se ha conseguido una impedancia equivalente que ayudara a caracterizar el comportamiento eléctrico de este electrodoméstico.

2.1 Uso de Inducción para Cocción de Alimentos

El uso de la inducción para la cocción de alimentos no es una tecnología relativamente nueva debido a que se la ha venido utilizando en algunos países de Europa y Norteamérica, el uso de esta técnica se lo ha hecho tanto de manera profesional como en los hogares [35].

La historia de los equipos que emplean campos magnéticos para cocinar los alimentos se remonta a la década de los años 50 del siglo pasado con prototipos de la empresa General Motors que se caracterizaban por poseer una sola zona de calentamiento finalmente estos modelos nunca fueron producidos en serie ni puestos a la venta al público, este principio fue aplicado únicamente en el sector industrial, un modelo mejorado de estos primeros prototipos fue desarrollado por el Centro de investigación de la compañía de origen

americano Westinghouse Electric Corporation en la década de los 70, los modelos desarrollados por esta empresa fueron en principio de una y dos zonas de inducción, una característica importante presente en estas cocinas fue la incorporación de circuitos electrónicos debido a que se empleó transistores en paralelo. El siguiente paso para esta empresa fue entre los años 1973 - 1975, el diseño y comercialización de cocinas de cuatro zonas para la cocción de alimentos como también la mejora de problemas de los primeros modelos entre ellos la sobrecarga y el calentamiento excesivo [36],[37].

En países europeos también se ha desarrollado la tecnología de las cocinas de inducción mediante convenios de empresas productoras de electrodomésticos e institutos de investigación universitarios un claro ejemplo de esto es el acuerdo que se dio entre BSH Electrodomésticos España S.A y la Facultad de Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Zaragoza en los años 90 como parte del Plan Concertado de Investigación Científica y Técnica (CAICYT), el resultado más palpable de esta investigación fue la presentación en 1999 de un modelo mucho más compacto de cocinas de inducción lo cual fue posible a que los sistemas electrónicos de control se encontraban integrados en cada una de las zonas de inducción [38].

En los últimos años los equipos de calentamiento por inducción han ido ganando popularidad e intensificando su uso debido a los beneficios que presenta en relación a los otros equipos de cocción y también debido al avance en los componentes electrónicos empleados en su fabricación lo que les ha permitido mejorar su desempeño así como también una reducción en el precio de venta al público.

Emplear la inducción para cocinar los alimentos, es un método donde el calentamiento se lo hace de manera directa a un recipiente (olla, sartén, etc.) debido al campo magnético inducido en la base de este, a partir de bobinas eléctricas, en lugar de utilizar la transferencia de calor por medio de la combustión de gas como en un sistema de cocción tradicional.

El principio de funcionamiento de estos equipos es el siguiente: una fuente generadora de alta frecuencia constituida por un circuito puente H y un inversor que se encarga de convertir el voltaje CA a altas frecuencias, de esta forma también las corrientes que se aplican a las bobinas serán de alta frecuencia, al circular esta corriente por la bobina genera un campo electromagnético de tal manera que cuando un recipiente de hierro o cualquier

otro material ferromagnético entra en contacto con este, se produce un exceso de calor en el recipiente que se transfiere en forma de calor a su interior [39],[40] . La transferencia de calor es inmediata y la regulación de la potencia de salida es posible gracias a una Modulación del Ancho de Pulso (PWM). En la sección 2.3 de este capítulo se explican más en detalla las partes que componen los equipos de cocción por inducción.

2.1.1 Ventajas del Uso de Inducción para Cocción de Alimentos

Emplear un equipo de inducción para cocinar los alimentos presenta las ventajas que se encuentran expuestas en la Tabla 2.1.

Seguridad: gracias a que no se emplea combustibles sólidos o hidrocarburos que necesiten ser combustionados para producir fuentes caloríficas, otra característica importante de estos equipos es contar con sensores que detectan la presencia de las ollas o también advertir la temperatura de la vitrocerámica, que es menor en comparación con la de la llama de una cocina convencional motivo por el cual causa menor impacto sobre la integridad física de una persona al tocarla [41].

Mayor Control y Rapidez: debido a que los campos magnéticos actúan directamente sobre la base y el cuerpo del menaje lo cual favorece a la transferencia del calor de manera directa. El control de esta transferencia es más rápido debido a los circuitos electrónicos con los que cuentan los equipos de inducción modernos [42].

Menor Cantidad de calor no Gastado: gracias a que la energía se suministra directamente en el recipiente por medio de campos magnéticos, esto hace que la gran mayoría de la misma se convierta en calor y mejora la eficiencia de estos equipos en relación a las cocinas convencionales. Esta característica a su vez tiene dos repercusiones; la primera es que el área de la cocina es más fresco debido a que el calor no es emitido al ambiente y la segunda es que la temperatura en la vitrocerámica es baja a excepción de las zonas de inducción donde es más elevada [42].

Adaptabilidad y Fácil instalación: son equipos que vienen listos para ser conectados y entrar en funcionamiento, en la actualidad existen cocinas de inducción que pueden funcionar a 120 o 220 VAC que son niveles de voltajes que se encuentran en los domicilios. Los diseños de las cocinas son modernos, la mayoría de los cuales son muy delgados a lo largo y ancho, mientras que su profundidad no supera los 5 cm por debajo de la vitrocerámica. Lo que los hace ideales para ser instalados sobre mesones o muebles de

cocina [43].

Fácil Limpieza: son equipos en los cuales no se acumula el hollín u otros subproductos propios de la combustión del GLP o el desprendimiento de los metales de los que están hechas las resistencias para el caso de las cocinas eléctricas de este tipo, en las zonas cercanas al área de cocción [42]. Al cocinar con equipos de inducción se elimina estos efectos además que el material de la vitrocerámica es antiadherente y al pasar un trapo húmedo se elimina las suciedades.

2.1.2 Desventajas del Uso de Inducción para Cocción de Alimentos

El hecho de cocinar con inducción presenta también algunas desventajas, las cuales se detallan a continuación:

El menaje: como ya se explicó anteriormente no todo los tipos de menaje que se encuentran en el mercado son aptos para su uso en cocinas de inducción. Da ahí que los materiales que más se emplean para la fabricación de este menaje son el acero inoxidable y el hierro o hierro fundido, sin embargo existen también utensilios de cocina en los cuales el cuerpo es de un tipo de material por ejemplo aluminio y la base está hecha de un material ferromagnético [44].

Cortes en el suministro eléctrico: al funcionar con electricidad, una cocina de inducción está expuesta a suspensiones de energía eléctrica, lo cual afecta la capacidad de cocinar en los hogares que sufran estos inconvenientes. En la actualidad los cortes de energía eléctrica son menos frecuentes debido a los avances tecnológicos que se han presentado en los últimos años en los circuitos de alta y media tensión, mejorando de esta manera la confiabilidad de los sistemas eléctricos. Además que en muchos hogares se encuentran instalados sistemas de generación de emergencia para sobrellevar este tipo de eventos.

Costo inicial: la inversión inicial al adquirir una cocina de inducción puede ser mayor en comparación con la de una cocina convencional de GLP debido a que el precio de la encimera de inducción suele ser mayor así como también a que es necesario adquirir nuevos utensilios en el caso de que los se tenga no sean aptos para usarlos con esta tecnología.

Otro costo que se puede presentar en algunos casos para el funcionamiento del equipo de inducción es que se necesite realizar modificación en los circuitos eléctricos de los domicilios lo cual también puede suceder al querer usar otro tipo de cocina eléctrica

(resistencia o vitrocerámica).

2.2 Principios aplicados en las Cocinas de Inducción

Los principios que se aplican en una cocina de inducción son los mismos que regulan el calentamiento inductivo y que está compuesto por tres factores básicos que son: la inducción electromagnética, el llamado efecto piel y la transferencia de calor [45]. Los mismos que serán explicados a continuación.

2.2.1 Inducción Electromagnética

La inducción magnética es un fenómeno físico mediante el cual campos magnéticos generan campos eléctricos. Al generarse un campo eléctrico en un material conductor, los portadores de carga se verán sometidos a una fuerza y se inducirá una corriente eléctrica en el conductor [46].

Este fenómeno fue descubierto por Joseph Henry y Michael Faraday en el año 1831, fue este último quien se encargó de publicar los resultados de sus experimentos. Uno de los cuales consistió en envolver dos cables alrededor de los lados opuestos de un anillo de hierro[46], el mismo que le llevo a enunciar la ley de Faraday que sustenta que una fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es igual a la negativa de la tasa de tiempo de cambio del flujo magnético a través del circuito [47].

Una fuerza electromotriz de una fuente, se define como el trabajo realizado por el dispositivo por unidad de carga. Se simboliza con ε y su abreviatura es fem y responde a la expresión (2.1) [47].

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.1)$$

Dónde:

$d\phi_m$: es el flujo del campo magnético.

dt : constituye la variación del tiempo.

Cuando se dice que un campo magnético genera una corriente eléctrica en un conductor, nos referimos a que aparece una fem (conocida como fem inducida) de modo que las cargas del conductor se mueven generando una corriente (corriente inducida), esto responde a la

expresión (2.2) [47] y a su vez el campo magnético puede hallarse mediante (2.3).

$$\oint Hdi = Ni \quad (2.2)$$

Dónde:

H: es la intensidad del campo magnético.

N: número de espiras.

di: representa a la variación de corriente.

i: es la corriente que fluye a través del conductor

$$\emptyset = \mu HA \quad (2.3)$$

Dónde:

\emptyset : es el flujo magnético.

μ : representa a la permeabilidad del medio.

H: Intensidad del campo magnético.

A: es el área.

La inducción electromagnética a su vez está influenciada por dos leyes importantes como lo son las siguientes:

a) *Ley de Ampere*

Fue establecida en 1826 por Marie Ampere y se encarga de explicar que la circulación de la intensidad de un campo magnético en un contorno cerrado es igual a la corriente que recorre ese contorno. El campo magnético se caracteriza por ser un campo vectorial de forma circular, cuyas líneas corresponden a la corriente [47].

Partiendo de lo anterior esta ley establece que para cualquier trayectoria cerrada, la suma de los elementos de longitud multiplicados por el campo magnético en la dirección de esos elementos de longitud, es igual a la permeabilidad multiplicada por la corriente eléctrica encerrada en ese bucle, esta definición se la puede resumir en la expresión (2.4) y se la aprecia en la Figura 2.1 [48].

$$\oint Bdl = B\Delta l = \mu i \quad (2.4)$$

Dónde:

B : es el campo magnético.

dl y Δl : representan la variación de longitud.

μ : es la permeabilidad.

i : corresponde a la corriente.

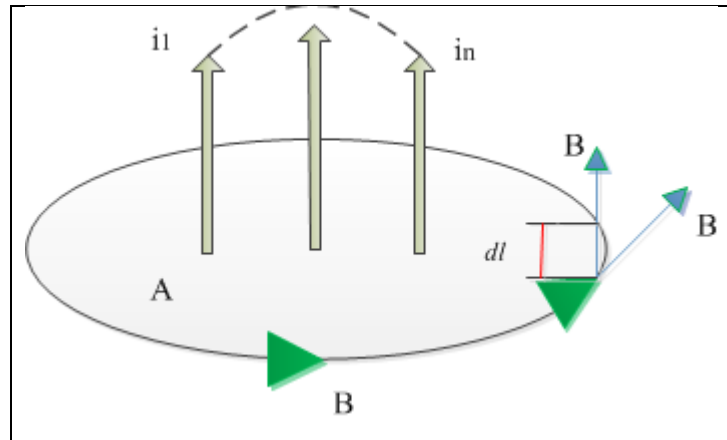


Figura 2. 1 Ley de Ampere.

Fuente: O. Semiconductor, “AND9166 / D Induction Cooking Everything You Need to Know,” 2014.

b) *Ley de Lenz*

Esta ley fue formulada por Heinrich Lenz en el año 1834, es una ley que surge como consecuencia del principio de conservación de la energía aplicada a campos electromagnéticos [49]. Es una ley que relaciona las variaciones que se presentan en un campo eléctrico de un conductor al producirse variaciones en el flujo magnético del mismo. Para ello asevera que las tensiones o voltajes inducidos sobre un conductor y los campos eléctricos asociados son de un sentido tal que se oponen a la variación del flujo magnético que las induce, lo cual se encuentra ilustrado en la Figura 2.2 [48]. Para el cálculo de este valor se puede usar (2.5).

$$\phi = BS = BS \cos \alpha \quad (2.5)$$

En la cual:

Φ : es el Flujo Magnético.

B : es el campo magnético inducido.

S : Superficie definida del conductor.

α : Ángulo formado entre el vector S perpendicular a la superficie definida por el

conductor y la dirección del campo.

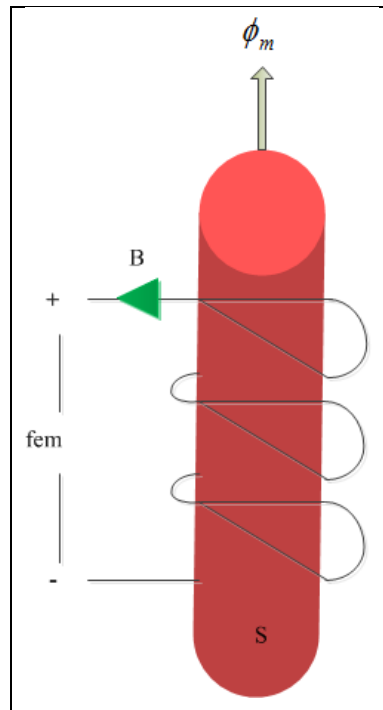


Figura 2. 2 Ley de Lenz.

Fuente: O. Semiconductor, “AND9166 / D Induction Cooking Everything You Need to Know,” 2014.

2.2.2 Efecto Piel

Constituye un fenómeno electromagnético ocasionado por la dificultad que sufren los campos electromagnéticos al penetrar en los materiales que presentan propiedades conductoras [50].

Cuando una corriente alterna (AC) circula por un elemento conductor, la distribución de esta no se realiza de manera uniforme dentro de él, esto principalmente se debe a que dicha distribución se la realiza de acuerdo a la frecuencia. De tal manera que cuando la frecuencia es elevada, la circulación solo se efectúa en las zonas exteriores del conductor [48],[50].Lo anteriormente explicado se encuentra ilustrado en la Figura 2.3 [50].

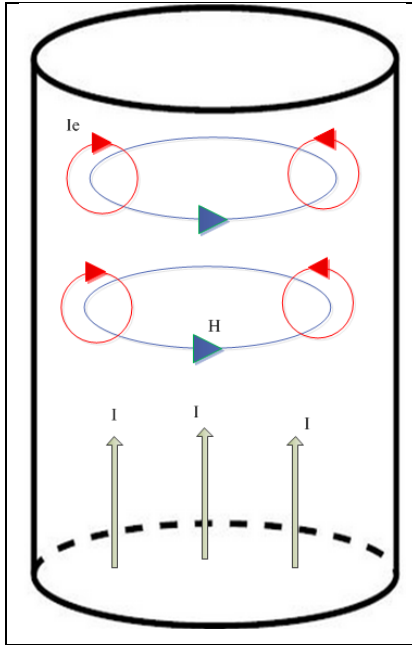


Figura 2. 3 Efecto Piel.

Fuente: S. Wentworth, “Calculating effective skin depth for thin conductive sheets,” *Antennas*, no. 1, pp. 4845–4848, 2006.

Las expresiones (2.6) y (2.7) son las que determinan el efecto piel se detallan a continuación:

$$J = J_s e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (2.6)$$

Dónde:

J : es la densidad de la corriente.

J_s : constituye la densidad de corriente en la superficie.

δ : es la llamada profundidad de piel.

d : es la profundidad.

De esta expresión se puede deducir que la densidad de corriente (J) disminuye de manera exponencial en relación con la densidad de corriente en la superficie (J_s) y el coeficiente resultante de la división entre la profundidad (d) con la profundidad de piel (δ).

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.7)$$

Dónde:

δ : es la profundidad de piel.

ρ : es la resistividad del conductor.

ω : es la velocidad angular y $\omega = 2\pi f$.

μ : es la permeabilidad.

2.2.3 Transferencia de Calor

Surge como consecuencia del efecto piel, debido a que produce la generación de corrientes denominadas como parasitas o de remolino (corriente de Foucault) sobre el conductor, Las mismas que generan una elevación de temperatura sobre el mismo, lo cual se puede observar en la Figura 2.4 [51].

Esta variación de temperatura sigue la ley de calentamiento del efecto Joule, que consiste en un proceso en el cual al circular una corriente eléctrica a través de un conductor es disipada como potencia y una consecuente liberación de calor [52]. Lo antes descrito se encuentra resumido en la primera ley de Joule y que aparece en (2.8).

$$Q = R * i^2 \quad (2.8)$$

Dónde:

Q : representan la cantidad de energía eléctrica que se convierte en calor.

R : es la resistencia equivalente del conductor.

i : es la corriente en el conductor.

De la expresión anterior se puede tener claro que la cantidad de calor liberado es directamente proporcional a la resistencia del menaje (dependiendo a su vez del material del que este fabricado) y al cuadrado de la corriente que circule por este.

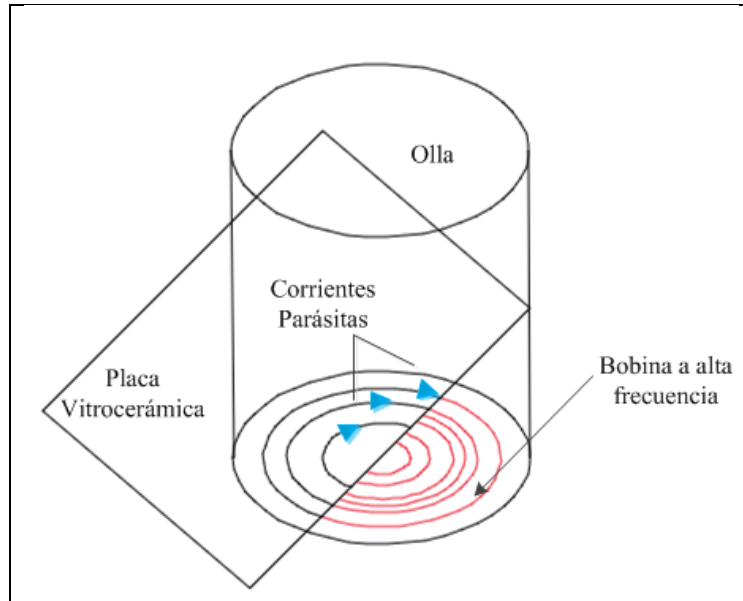


Figura 2. 4 Transferencia de calor en cocina de inducción.

Fuente: J. Van Bladel, “Foucault currents in a conducting sphere moving with constant velocity,” IEE Proc. A (Physical Sci. Meas., 1988.

2.3 Descripción de los elementos constituyentes de una Cocina de Inducción

Una cocina eléctrica de inducción está constituida por algunos elementos, los mismos que pueden ser incluidos dentro de subsistemas como se muestra en la Figura 2.5 [53]. Estos subsistemas se encargan de cumplir una función específica en el correcto funcionamiento de este electrodoméstico, las mismas que se detallan a continuación.

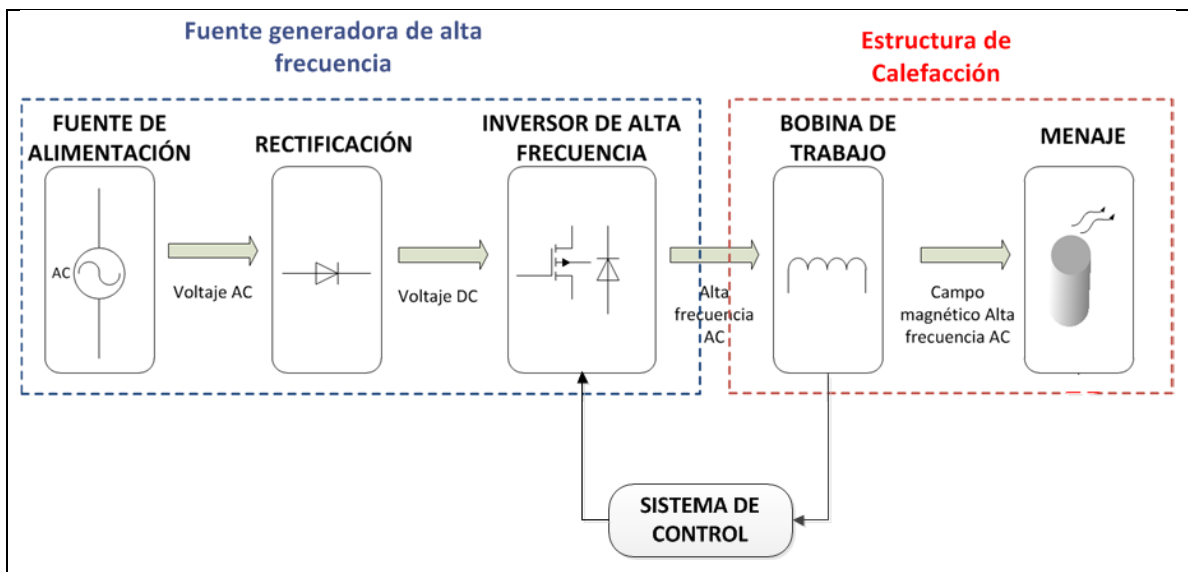


Figura 2. 5 Configuración de una cocina de inducción.

Fuente: A. Riofrio and D. Carrión, “Approach and Deployment of Distributed Generation. State-of-art Based on Induction Cooker System,” in ANDESCON 2014, 2014.

2.3.1 Fuente de alimentación

Es el sistema encargado de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de la cocina, se caracteriza por tener un voltaje en AC con una frecuencia nominal de 50 o 60 Hz, dependiendo del lugar donde se encuentre la instalación. Generalmente esta tensión es provista a los hogares por los sistemas de distribución de las empresas comercializadoras de energía eléctrica. En palabras más sencillas constituye el voltaje que se puede encontrar en los terminales de un tomacorriente en cualquier hogar.

2.3.2 Rectificación

El voltaje que es provisto por nuestra fuente de alimentación debe ser convertido de CA a CC y es ahí donde se emplea los denominados circuitos inversores, cuyo uso en electrodomésticos es muy común para alimentar sus diferentes circuitos. Este tipo de circuitos se caracterizan por estar constituidos fundamentalmente por diodos rectificadores. Los circuitos rectificadores pueden ser clasificados según el tipo de rectificación en media onda y onda completa, siendo este último el de mayor aplicación para el caso de una cocina eléctrica de inducción o cualquier otro electrodoméstico que se encuentra en nuestros hogares, esto se debe a que la corriente continua obtenida a la salida de este circuito es muy parecida a la que proporciona un pila o batería. La configuración del circuito como la forma de onda obtenida se muestra en la Figura 2.6.

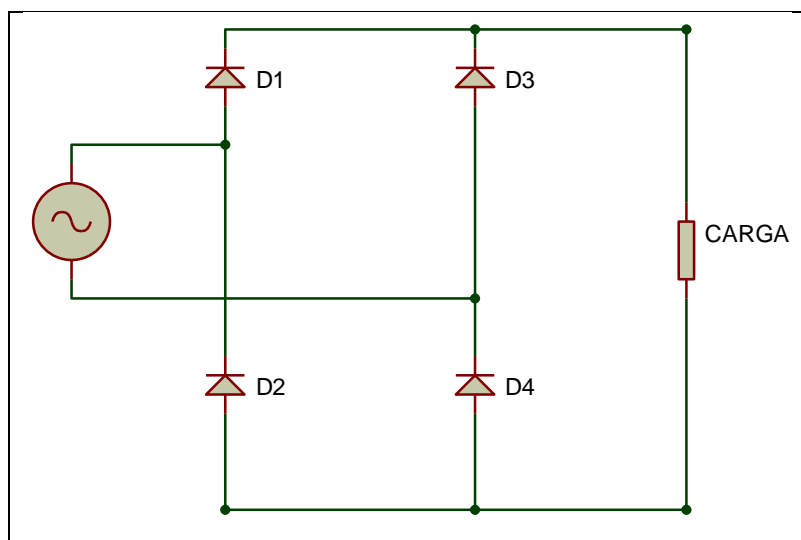


Figura 2. 6 Configuración circuito rectificador.

Fuente: Autor

2.3.3 Inversor de alta frecuencia

Los inversores de alta frecuencia son circuitos constituidos principalmente por transistores y diodos una onda de tensión o corriente de alta frecuencia. Los componentes utilizados en este tipo de circuitos se caracterizan por conducir de manera bidireccional la corriente para el caso de los inversores de tensión y unidireccionales para los inversores de corriente [54]. La función de un circuito inversor es cambiar un voltaje de entrada, generalmente en CC en un voltaje simétrico de salida CA, con una magnitud y frecuencia deseada, tanto este voltaje como su frecuencia pueden ser variables o fijos.

Al circuito inversor de alta frecuencia de una cocina de inducción viene añadido un circuito resonante, cuyo objetivo es filtrar la onda de salida obtenida del inversor de tal forma que la misma tenga una forma lo más senoidal posible. Asimismo este circuito resonante es el encargado de suministrar el voltaje y corriente necesarios por la carga, manejando las corrientes mínimas de entrada a los transistores buscando de esta forma disminuir las pérdidas por conmutación [55].

En los sistemas de calentamiento por inducción existen algunas topologías de circuitos inversores de alta frecuencia los cuales se detallarán a continuación.

a) *Inversor de Medio Puente*

Este tipo de inversor está constituido por dos capacitores en serie de igual valor, los cuales reciben la señal de entrada en CC, de esta manera cada capacitor se carga a la mitad del voltaje de alimentación. Los transistores del inversor de medio puente deben ser capaces de soportar un voltaje igual al de alimentación y el valor máximo de voltaje de la onda cuadrada de salida que es igual a la mitad del voltaje de alimentación [48][54].

Este tipo de inversor funciona de la siguiente forma: cuando el transistor Q1 está activo durante el tiempo $T_o/2$, el voltaje instantáneo a través de la carga V_i es $V_s/2$. Si el transistor Q2 está activo durante un tiempo $T_o/2$, aparece el voltaje $-V_s/2$ a través de la carga. El circuito debe diseñarse de tal forma que, Q1 y Q2 no estén activos simultáneamente, este circuito está representado en la Figura 2.7 [54]. Este inversor también posee dos capacitores en serie C_R , que se encuentran conectados en paralelo al circuito antes explicado.

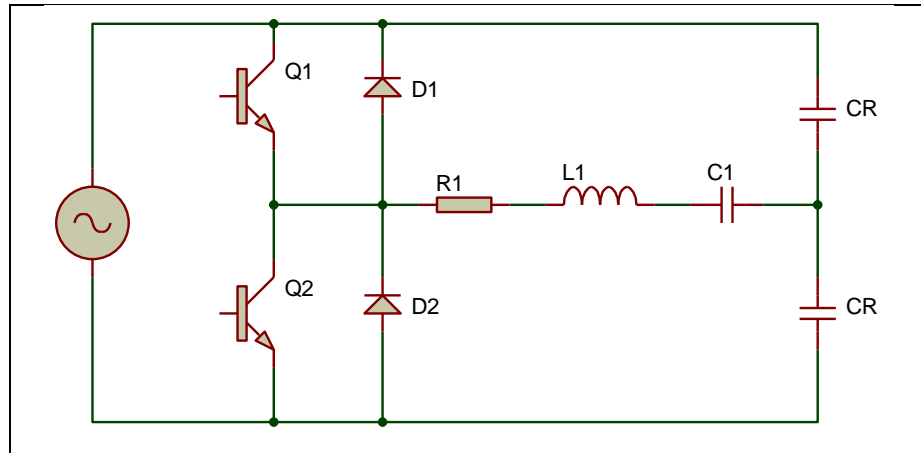


Figura 2. 7 Inversor de Medio Punte.

Fuente: Y. Zhongming, “A half-bridge hybrid resonant inverter with novel pulse phase modulation control,” Conf. 2006. PESC’ , 2006.

b) *Inversor de Punte Completo*

Presentan un principio de funcionamiento similar al inversor de medio puente, con la variación que para este tipo de inversores disponen de cuatro transistores, los cuales para este tipo de circuitos actúan simultáneamente de dos. De tal manera que cuando los transistores Q1 y Q2 se activan simultáneamente, el voltaje de alimentación V_s aparece a través de la carga. Si los transistores Q3 y Q4 se activan al mismo tiempo, el voltaje a través de la carga se invierte, y adquiere el valor de $-V_s$. Con la misma entrada de voltaje CC, el máximo valor de voltaje a la salida del inversor de puente completo es el doble que el de medio puente. Esto implica que para la misma potencia, la corriente de salida y la corriente de conmutación son la mitad de aquellas para el inversor de medio puente [55], [56]. El diagrama de este tipo de inversor se ilustra en la Figura 2.8 [55].

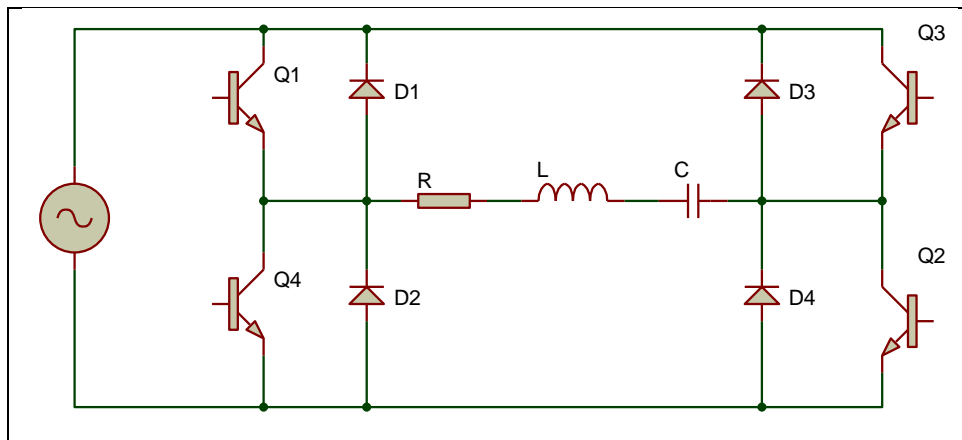


Figura 2. 8 Inversor de Punte Completo.

Fuente: N. a. Ahmed, Y. Miura, T. Ahmed, E. Hiraki, a. Eid, H. W. Lee, and M. Nakaoka, “Quasi-

c) *Convertidor resonante de conmutación a voltaje cero (ZVS)*

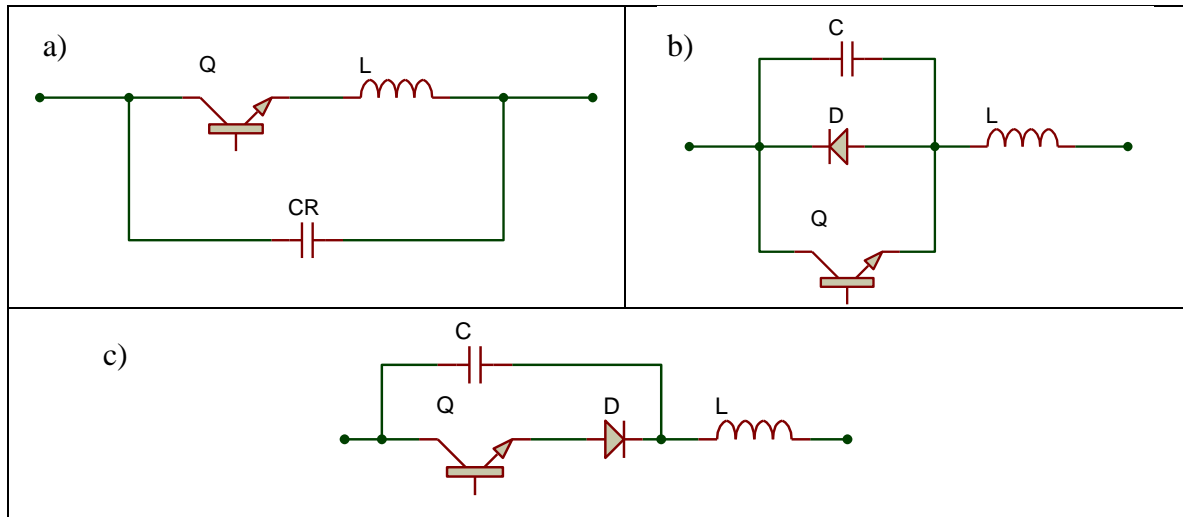


Figura 2. 9 Inversor ZVS: a) Circuito básico, b) Circuito ZVS de media onda, c) Circuito ZVS de onda completa.

Fuente: M. Mezaroba, D. C. Martins, and I. Barbi, “A ZVS PWM inverter with active voltage clamping using the reverse recovery energy of the diodes,” IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., vol. 52, no. 10, pp. 2219–2226, Oct. 2005.

Son circuitos que emplean la técnica de conmutación ZVS, cuya principal funcionalidad es eliminar las pérdidas por conmutación en frecuencias altas, en el rango de los MHz. Está conformado por un condensador resonante C_R conectado en paralelo con el transistor y un inductor (bobina) L conectado en serie con el mismo transistor [57].

Los transistores empleados en este tipo de inversores se activan o desactivan cuando el voltaje es igual a cero, basa su funcionamiento en que para conseguir la conmutación por voltaje en el capacitor C se conecta en paralelo al transistor Q . La capacitancia interna de conmutación C_j se aumenta a la del capacitor C , la misma que solo afecta a la frecuencia de resonancia, aportando de esta manera a que no exista excitación de potencia en el transistor. Esto se aprecia en la Figura 2.9 (a) [58].

De este que se puede considerar como el circuito elemental del convertidor resonante de conmutación a voltaje cero se pueden obtener dos variantes: la primera, si se añade un diodo D conectado en antiparalelo entre el transistor Q y el capacitor C tal como se muestra en la Figura 2.9 (b), para este caso el circuito estará realizando una conversión en media onda. La segunda configuración es que el diodo D se conecte en serie con el transistor Q ,

de esta forma el voltaje que circula a través del capacitor C puede oscilar libremente y el inversor trabaja en una configuración de onda completa, esta variación aparece en la figura 2.9 (c).

d) *Convertidores resonantes de conmutación a corriente cero (ZCS)*

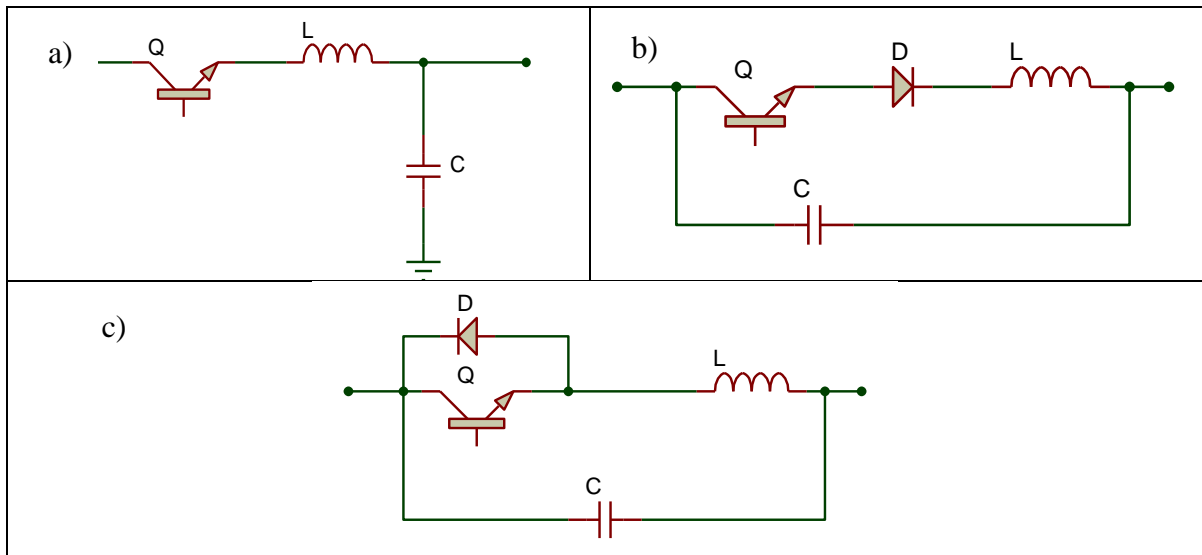


Figura 2. 10 Inversor ZCS: a) Circuito básico, b) Circuito ZCS de media onda, c) Circuito ZCS de onda completa.

Fuente: H. Ogiwara and M. Nakaoka, “ZCS high frequency inverter using SIT for induction heating applications,” IEE Proceedings-Electric Power Appl., 2003.

Es un circuito que al igual que el inversor ZVS surgió para reducir las pérdidas por conmutación que se presentan en los circuitos inversores. Este tipo de convertidores están compuestos por un transistor al cual se conecta un circuito resonante LC, logrando de esta manera que la forma de onda en el elemento de conmutación oscile de una manera casi sinusoidal. Los convertidores resonantes ZCS se activan y desactivan cuando la corriente tiene un valor igual a cero, los elementos constituyentes de este tipo de circuito son un transistor Q, un inductor L y un capacitor C [55],[57].

El inductor L se encarga de limitar la variación de la corriente de conmutación respecto al tiempo, razón por la cual el circuito conformado por L y C constituye un elemento resonante en serie. El principio de funcionamiento es el siguiente: cuando la corriente de conmutación es cero, se presenta una corriente $i = C_j dV/dt$, en la cual C_j representa la capacitancia interna de conmutación que se suma al capacitor C de forma que la corriente que circula por C_j debido a la pendiente del voltaje de conmutación en el momento de

desactivación. Esta circulación de corriente provoca una disipación de potencia en Q además de limitar la frecuencia de conmutación [55],[59].

Este dispositivo puede funcionar tanto en configuración de media onda u onda completa, para lo cual es necesario aumentar al circuito básico un diodo D que es el encargado de permitir que el flujo de corriente sea unidireccional para el primer caso y bidireccional en el segundo, esto se lo puede apreciar en la Figura 2.10 [59].

2.3.4 Bobina

Constituye el elemento fundamental del calentamiento por inducción, es el encargado de generar y transmitir los campos magnéticos que son inducidos en el menaje, lo cual se lo hace mediante un acoplamiento magnético. Para el caso de las bobinas en cocinas de inducción la forma de mayor aplicación constituye la de devanados en espiral de tipo plano, esto se hace en consideración al diámetro de las zonas de calentamiento [60].

Desde el punto de vista del diseño de un inductor es importante considerar: el número de vueltas que dispondrá la bobina, la potencia nominal de la zona de inducción, la topología del inversor y el voltaje nominal al cual funcionará el equipo. Otro aspecto a considerar en el diseño de estos elementos, son las pérdidas que se producen en el material del que está hecha la bobina es decir del cable de cobre y es por esto que en los últimos años se han empleado diferentes tipos de perfiles para los inductores internos como: cintas o bobinas, cables redondos y cables múltiples hilos trenzados, pudiéndose encontrar de este dos variantes como son que los hilos sean de cable sólido o flexible. Siendo el último el que mayor rendimiento presenta tanto técnica como económicamente y de ahí que sea el más usado en la actualidad [42]. El cálculo de la eficiencia del sistema de calentamiento puede realizarse empleando (2.10).

$$\eta_{ind} = \frac{Pl}{Pt} = \frac{Pl}{Pw + Pl} \quad (2.10)$$

Dónde:

η_{ind} : es la eficiencia del sistema de calentamiento.

Pl : es la potencia transferida a la carga.

Pt : es la potencia total suministrada.

P_w : es la potencia disipada en el conductor.

2.3.5 Olla

Los recipientes a emplearse sobre las cocinas de inducción deben estar fabricados con materiales ferromagnéticos, debido a que presentan algunas características que permiten maximizar la transferencia de potencia a altas temperaturas a una carga minimizando las pérdidas en la fuente, tres de las características más relevantes que debe presentar el material del menaje para cocina de inducción son la permeabilidad relativa que es la encargada de atraer o hacer circular los campos magnéticos por lo general para su representación se emplea el símbolo μ , para la determinación del valor de este parámetro se puede emplear (2.11).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.11)$$

Dónde:

B: constituye la inducción magnética existente en el material.

H: es la intensidad del campo magnético que en el interior del material.

La segunda propiedad es la conductividad eléctrica representada por σ_e y es aquella que determina la capacidad de un material al paso de la corriente eléctrica, presenta una correlación directa tanto con la estructura molecular como atómica del mismo, finalmente la conductividad térmica es aquella propiedad que facilita la absorción y transmisión de energía en un material, es una característica que presenta una relación directa tanto con el tiempo y el área de calentamiento es así que para un material con un buen coeficiente de conductividad térmica se podrá calentar más rápido una cierta área trasladando este calor hacia las zonas no calentadas, se la simboliza usando σ_t [61].

En el Anexo A se muestra los valores de las propiedades físicas de algunos de los materiales empleados para la fabricación de menaje para cocinas de inducción.

2.3.6 Sistema de control

Es un circuito electrónico, que tiene como componente principal a un microcontrolador el cual se encarga de recibir todas las señales de entrada provenientes desde pulsadores o sensores, para luego conociendo su estado lógico ejecutar una acción basándose en el algoritmo de control que se encuentra programado en su memoria interna [54].

Las principales señales de entrada con las cuales actúa el sistema de control son: los

pulsadores de encendido y apagado, los mandos de control de potencia, pulsante de bloqueo del equipo, temporizadores, sensor de temperatura de la placa vitrocerámica y sensor de presencia de menaje, con estos datos la programación del microcontrolador calcula automáticamente la cantidad de energía que se necesita para alcanzar el punto óptimo de trabajo con un tiempo mínimo pero sin que se produzcan sobreimpulsos tanto de voltaje como de frecuencia [62].

2.4 Determinación del modelo equivalente para las cocinas de inducción.

En términos generales un sistema de calentamiento por inducción puede ser aproximado al modelo de un transformador eléctrico, para el caso específico de una cocina de inducción el lado primario de este transformador estará conformado por un circuito LC donde: L representara a la bobina que se encuentra debajo de cada una de las zonas de inducción y C al circuito inversor resonante. Mientras que el lado secundario está constituido por la parte inferior o base de la olla, es decir que constituye el elemento que cierra el circuito para este transformador [48],[63].

Para el caso de un transformador eléctrico, algo importante es la relación de transformación denotado por m y que representa la relación existe entre el número de devanados en el lado primario (N_p) como del lado secundario (N_s), siendo esto lo que determina si se trata de un transformador amplificador o reductor. Esto se encuentra ilustrado en la Figura 2.11 [64].

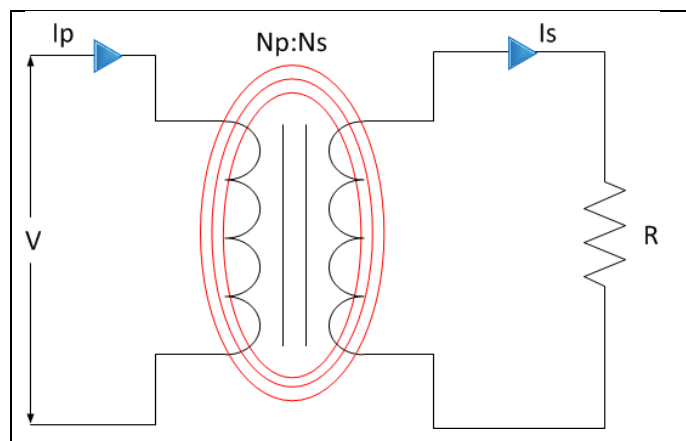


Figura 2. 11 Circuito equivalente del calentamiento por inducción.

Fuente: H. Chun-Liang, "Circuits analysis of inductive heating-device with half-bridge resonated inverter," ... 11th WSEAS Int. Conf. Circuits- ..., pp. 26–30, 2007.

Como se mencionó anteriormente, en una cocina de inducción el lado secundario está constituido por el menaje, razón por la cual N_s tiene un valor igual a uno lo que da como

resultado que la corriente en el lado secundario I_s pueda ser definida por (2.12). Esta variación al circuito de la Figura 2.11 está representada en la Figura 2.12 [65].

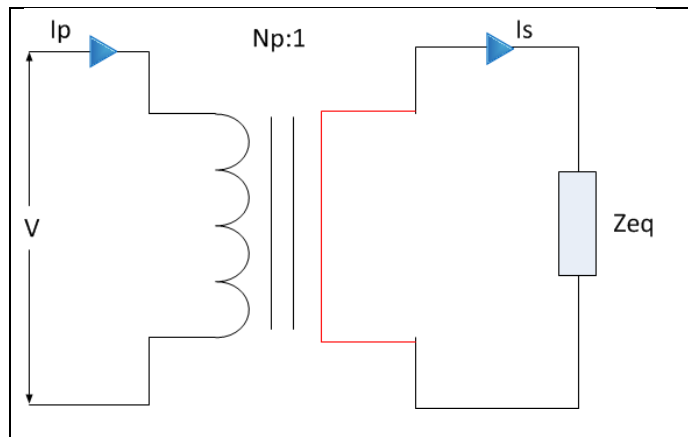


Figura 2. 12 Modificación del circuito equivalente del calentamiento por inducción.

Fuente: P. Chamsuk and J. Srinonchat, “Study and Development Inductance Melting Control System Using low Energy,” Energy Procedia, vol. 34, pp. 945–950, Jan. 2013.

$$I_s = I_p * N_p \quad (2.12)$$

Con estas consideraciones el circuito equivalente para una cocina de inducción constituye un circuito RLC en serie, el mismo que se muestra en la Figura 2.13. Este circuito responde al principio de funcionamiento de la cocina en altas frecuencias, el resolver este circuito nos permitirá encontrar la impedancia equivalente (Z_{eq}), factor que nos permitirá caracterizar el comportamiento de este equipo durante su funcionamiento [65].

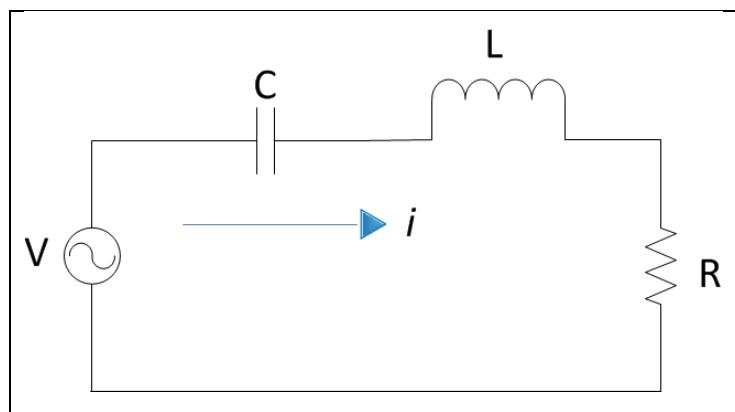


Figura 2. 13 Circuito Equivalente de la cocina de inducción.

Fuente: P. Chamsuk and J. Srinonchat, “Study and Development Inductance Melting Control System Using low Energy,” Energy Procedia, vol. 34, pp. 945–950, Jan. 2013.

Para obtener el valor de la impedancia equivalente de la Figura 2.12, se parte de la

expresión (2.13).

$$Z_{eq} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.13)$$

Dónde:

Z_{eq} : impedancia equivalente.

R : resistencia.

X_L : reactancia inductiva.

X_C : reactancia capacitiva.

Si en (13) se rempazan las expresiones que caracterizan tanto a la reactancia inductiva como capacitiva (2.14) y (2.15), podemos llegar a tener (2.16), la misma que deja nuestra impedancia equivalente Z_{eq} en función de la frecuencia (f).

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.14)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.15)$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R^2 + \left[2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right]^2} \quad (2.16)$$

Para conocer el valor de la corriente que circula por el circuito de la Figura 2.12, es decir la corriente de funcionamiento de la cocina de inducción se puede aplicar la Ley de Ohm a la cual corresponde (2.17), para de esta forma obtener la expresión (2.18).

$$i = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (2.17)$$

$$i = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left[2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right]^2}} \quad (2.18)$$

Dónde:

i : corriente de funcionamiento.

V : voltaje de alimentación.

L : inductancia.

C : capacitancia.

R : resistencia.

f : frecuencia.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LA MICRO RED FOTOVOLTAICA

Este capítulo está destinado a abordar tres temas principales como son: la construcción de una función de transferencia que ayude a obtener el consumo de potencia de la cocina de inducción, diseñar y dimensionar un sistema de generación eléctrico fotovoltaico para la alimentación de una cocina de inducción y proponer un modelo de operación aplicable al sistema fotovoltaico buscando optimizar la energía generada y depender lo menos posible de las redes de distribución eléctrica.

Dentro del primer tópico se han aplicado las leyes de Kirchhoff para construir la función de transferencia deseada, asimismo se explica la opción de utilizar el programa Matlab para obtener funciones de transferencia para procesos, partiendo de utilizar los datos de entrada y salida que intervengan en los mismos. Previo al diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico es importante conocer el comportamiento de la demanda a ser alimentada, razón por la cual el segundo tópico de este capítulo es la simulación de la curva de demanda a través de una interface desarrollada en GUI de Matlab, así como también la medición de la demanda real del equipo siendo empleado por una familia conformada por cuatro personas.

El tercer tema tratado consiste en la metodología empleada para el dimensionamiento y diseño de la micro red fotovoltaica explicada a detalle, mientras que la última temática del presente capítulo plantea la necesidad de aplicar modelos de operación a sistemas de generación distribuida fotovoltaicos considerando los conceptos de autoconsumo instantáneo y autoconsumo con acumulación.

3.1 Construcción de una función de transferencia para la cocina de inducción.

Para poder llevar a cabo este cometido, se partirá del circuito presentado en la Figura 2.13 del capítulo anterior, en el cual aplicaremos la ley de voltaje de Kirchhoff la misma que dice: en un circuito eléctrico existe un voltaje total (V_{tot}), que es igual a la suma de los voltajes que se puede medir en cada uno de los extremos o terminales de los elementos que

lo constituyen (resistencias, bobinas o condensadores) [66],[67]. Aplicando esta ley al circuito que se encuentra bajo estudio, tal como se observa en la Figura 3.1, se obtiene la expresión (3.1) que representa el valor del voltaje que circulará por el circuito equivalente de la cocina de inducción.

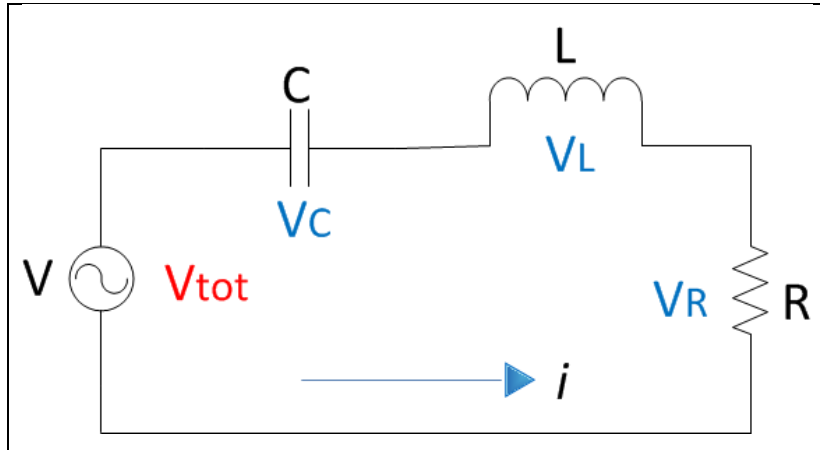


Figura 3. 1 Aplicación de la Ley de voltaje de Kirchoff al circuito equivalente de la cocina de inducción.

Fuente: Autor

$$V_{tot} = V_C + V_L + V_R \quad (3.1)$$

Dónde:

V_{tot} : Voltaje total en el circuito.

V_C : Voltaje en el capacitor.

V_L : Voltaje en el inductor.

V_R : Voltaje en la resistencia.

Si a la expresión anterior le aplicamos el concepto de ecuaciones diferenciales se obtendrá la expresión (3.2), la misma que está en el dominio del tiempo y considera la corriente que circula por el circuito en estudio.

$$V(t) = \frac{1}{C} \int i \, dt + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3.2)$$

Dónde:

$V(t)$: Voltaje total en el circuito en función del tiempo.

C : Valor del capacitor.

L : Valor del inductor.

R : Valor de la resistencia.

i : Corriente.

di : Diferencial de corriente.

dt : Diferencial de tiempo.

Para la construcción de la función de transferencia se ha considerado un sistema formado por los circuitos que se ilustran en la Figura 3.2 (a) en la cual se considera el comportamiento del circuito RLC equivalente y el de la Figura 3.3 (b) donde se considera el comportamiento de la bobina, a la cual también se le ha aplicado la ley de voltaje de Kirchhoff obteniendo (3.3).

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.3)$$

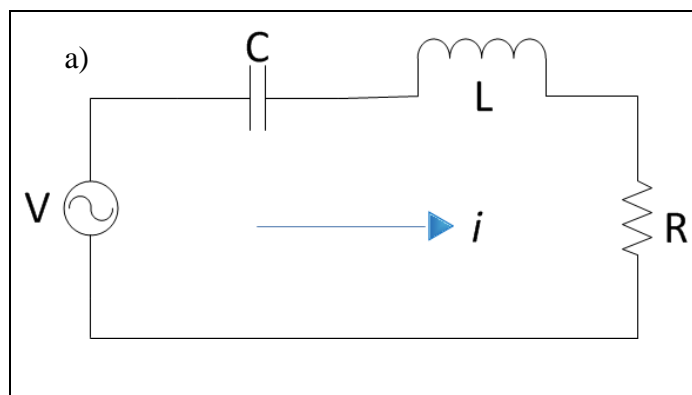
Dónde:

V_L : Voltaje total en el inductor.

L : Valor del inductor.

di : Diferencial de corriente.

dt : Diferencial de tiempo.



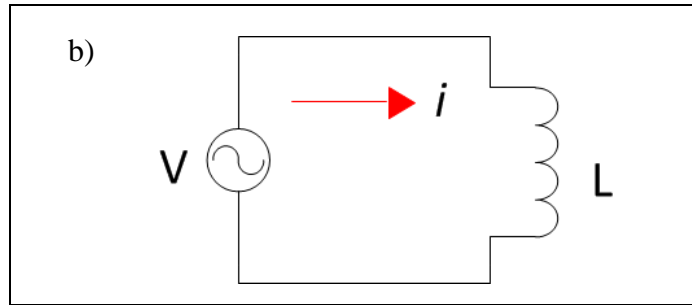


Figura 3. 2 Sistema para construcción de función de transferencia: a) Circuito RLC equivalente de la cocina de inducción, b) Circuito de la bobina de inducción.

Fuente: Autor

Con lo cual utilizando (3.2) y (3.3) se puede analizar el comportamiento del sistema representado por el circuito de las Figuras 3.1 y 3.2 (a). Este modelo matemático también nos ayudará a obtener la función de transferencia del circuito, para esto se aplica la transformada de Laplace tanto a (3.2) como a (3.3), con la finalidad de obtener un comportamiento en función de la frecuencia de operación de la cocina que de acuerdo a ensayos realizados es la que determina el consumo de potencia de este electrodoméstico. Y es así que se obtienen las siguientes expresiones:

$$V(s) = \frac{1}{Cs} I(s) + Ls I(s) + R I(s) \quad (3.4)$$

$$V_L(s) = Ls I(s) \quad (3.5)$$

Dónde:

$V(s)$: Voltaje en el circuito en función de la frecuencia.

Cs : Valor del capacitor en función de la frecuencia.

Ls : Valor del inductor en función de la frecuencia.

R : Valor de la resistencia función de la frecuencia.

$V_L(s)$: Voltaje en el inductor en función de la frecuencia.

$I(s)$: Corriente en función de la frecuencia.

De manera experimental se ha logrado determinar que la magnitud de la corriente que circula por la cocina de inducción es la que más variación presenta además de ser la magnitud que tiene mayor incidencia en el consumo de potencia activa, razón por la cual es importante analizar este parámetro en el circuito equivalente y es así que las expresiones

(3.4) – (3.5) se modifican en (3.6) y (3.7).

$$Ii(s) = \frac{V(s)}{\frac{1}{Cs} + Ls + R} \quad (3.6)$$

$$Io(s) = \frac{V_L(s)}{Ls} \quad (3.7)$$

Empleando el concepto de función de transferencia, la cual se define como el cociente entre la transformada de Laplace de salida que para este caso es la corriente en el inductor $Io(s)$ expresada en (3.7) y la transformada de Laplace de entrada o excitación representada por la corriente en el circuito equivalente $Ii(s)$ expuesta en (3.6) [68]. Se tiene que:

$$G(s) = \frac{V(s)}{V_L(s)} \left(\frac{1}{Lcs^2} + \frac{R}{Ls} + 1 \right) \quad (3.8)$$

3.1.1 Verificación de la función de transferencia

Con la finalidad de verificar la función de transferencia obtenida en (3.8), además de contar con un respaldo que permita realizar la caracterización del funcionamiento de una cocina de inducción se ha utilizado el software Matlab. Para esta verificación se ha realizado dos procedimientos los cuales se detallan a continuación.

3.1.1.1. *Proceso experimental para adquisición de datos*

En un laboratorio se llevó a cabo un proceso experimental bajo condiciones controladas, se realizó un total de nueve ensayos por cada una de las zonas de inducción que posee la cocina, es decir uno por cada nivel de potencia.

Para la realización de estos experimentos se ha empleado: una cocina de inducción ensamblada por fabricantes nacionales de iguales características a las que se encuentran a la venta al público, un medidor de parámetros eléctricos (Marca: Siemens, Modelo: Sentron PAC3200), un computador, un cable de conexión, un cronómetro, menaje de material ferromagnético y un litro de agua. Estos equipos se los procedió a conectar como se lo aprecia en la Figura 3.3.

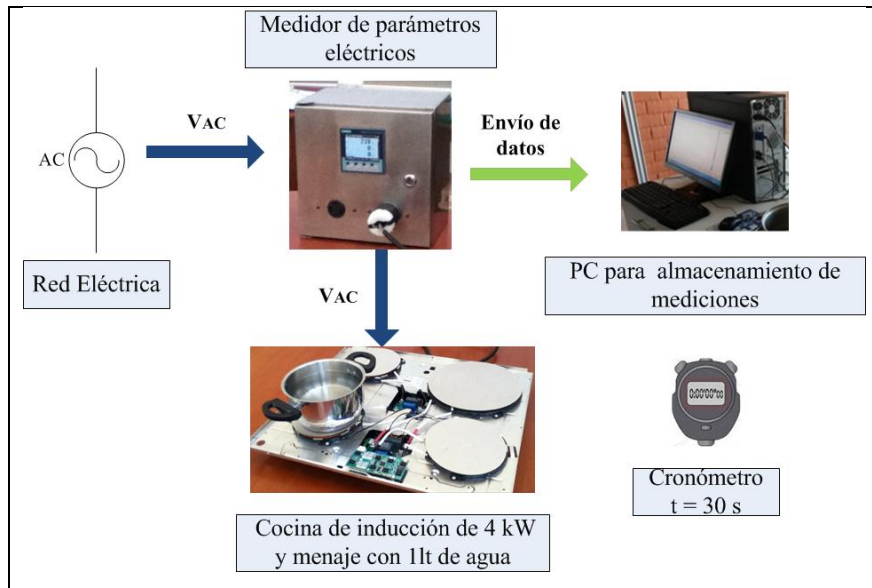


Figura 3. 3 Esquema del proceso experimental para obtención de datos de la cocina de inducción para la verificación de la función de transferencia.

Fuente: Autor

Lo que se busca con esta disposición de los equipos es poder medir datos del comportamiento de voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, porcentaje de distorsión armónica tanto de voltaje como corriente de lo cual se encarga el medidor de parámetros eléctricos, estos datos son transferidos al computador mediante comunicación Ethernet y una interface desarrollada en LabVIEW que permite almacenar estos datos en un archivo de extensión txt lo cual facilita su posterior utilización.

El proceso experimental como tal constituye en colocar un litro de agua en el recipiente de material ferromagnético, después una vez sobre la zona de inducción se coloca está en potencia 1 durante un periodo de tiempo igual a 30 segundos registrado por el cronometro, una vez terminado este tiempo se vuelve a repetir el ensayo pero esta vez con potencia 2 durante el mismo intervalo de tiempo, este proceso se lo repite sucesivamente hasta llegar a la potencia 9 o máxima. Es importante mencionar que los datos de los parámetros eléctricos durante los ensayos son tomados y registrados cada 0.5 segundos.

3.1.1.2. Obtención de función de transferencia

Para poder obtener la función de transferencia mediante el software Matlab, el primer paso lo constituye la tabulación de los datos obtenidos del proceso experimental en el archivo de extensión txt, para esto se ha ordenado en un archivo de extensión xls los valores de los

parámetros eléctricos medidos de acuerdo al nivel de potencia y acorde a la zona de inducción que corresponde.

De los datos recopilados se ha podido confirmar que los valores de la corriente eléctrica son los que presentan mayor variación junto con el valor de la potencia consumida por el equipo bajo estudio y es por esta razón que se ha decidido emplear estas dos variables para la verificación de la función de transferencia determinada con anterioridad.

Para la verificación se ha empleado una herramienta del programa Matlab llamada “System Identification Toolbox”, la cual permite construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos en función de datos medidos de entrada y salida. Los datos a emplearse en esta herramienta pueden estar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia y es aplicable para encontrar funciones de transferencia tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto, modelos de procesos así como modelos del estado-espacio [69].

Para acceder a esta herramienta se debe escribir la sentencia “ident” en la ventana de comandos de Matlab, una vez ejecutado se despliega una pantalla igual a la que aparece en la Figura 3.4.

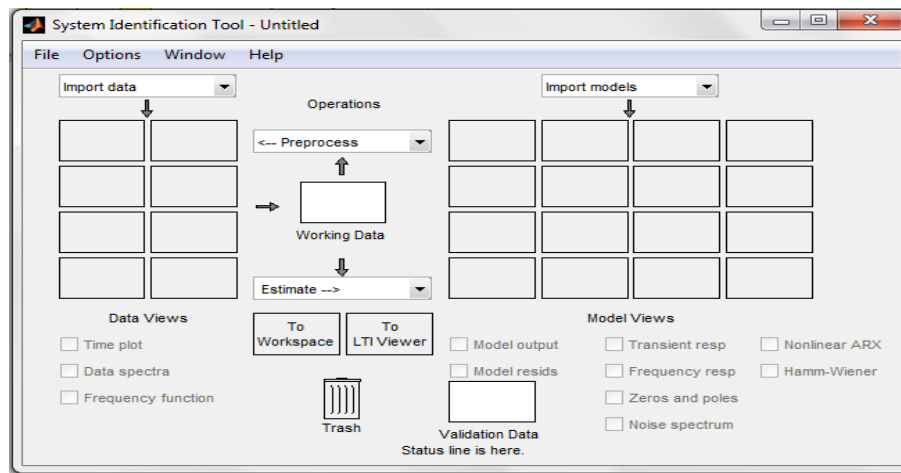


Figura 3. 4 Ventana principal del System Identification Toolbox.

Fuente: Autor

El proceso dentro de esta herramienta para conseguir la función de transferencia es el siguiente:

a) Importación de datos

Los datos ordenados y almacenados en el archivo xls son trasladados al Matlab mediante la creación de dos de variables que para este caso han sido denominadas corriente_in y potencia_out, las mismas que almacenarán estos valores. En la pantalla principal del System Identification Toolbox se encuentra la opción para importar estos valores además del intervalo de tiempo con el cual fueron tomados.

Los valores de entrada y salida que han sido cargados pueden ser graficados, en la Figura 3.5 se muestran estos datos para la potencia 1 de una zona de inducción pequeña.

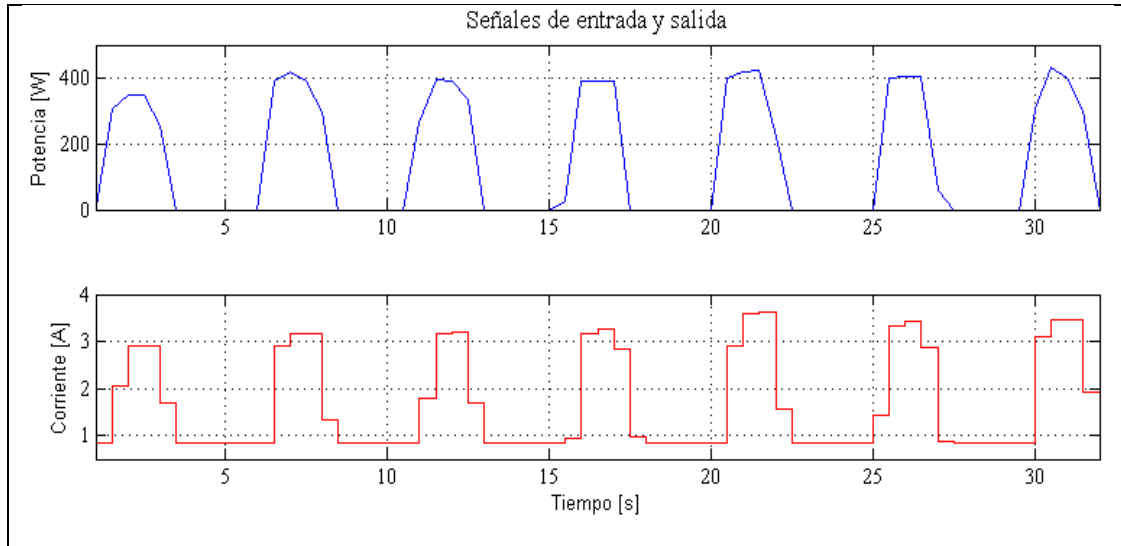


Figura 3. 5 Señales de entrada y salida cargadas para la determinación de la función de transferencia.

Fuente: Autor

El comportamiento que se observa en la Figura 3.5 es un comportamiento muy semejante para todos los niveles de potencia de cada una de las zonas de inducción, además que como se aprecia se trata de una función periódica por lo que tomando en cuenta estas dos consideraciones se ha decidido considerar solamente un periodo para la determinación de la función de transferencia. El periodo elegido para llevar a cabo la comprobación se lo muestra en la Figura 3.6.

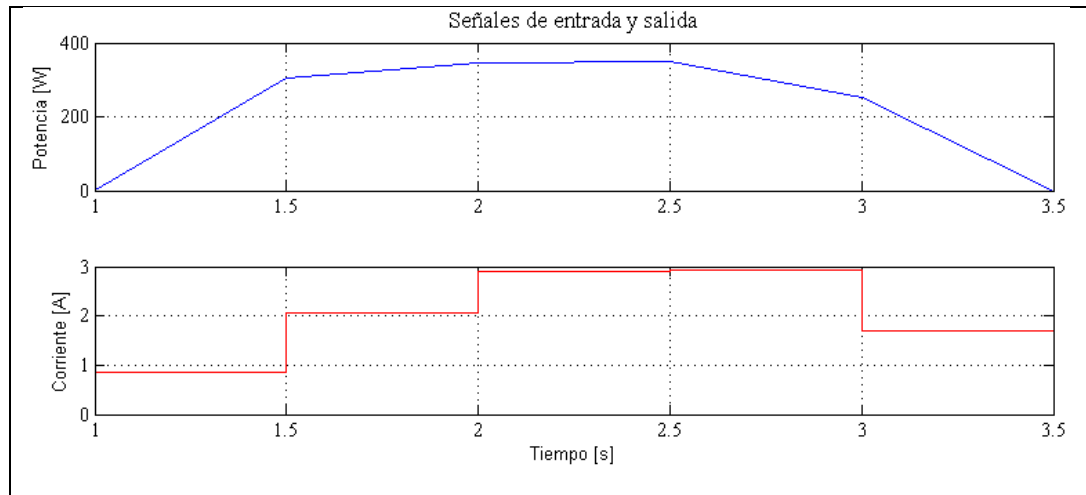


Figura 3. 6 Señales de entrada y salida definitivas cargadas para la determinación de la función de transferencia.

Fuente: Autor

b) Estimación de la función de transferencia

Una vez cargados los datos definitivos, se selecciona la opción de estimar en la cual encontramos una lista desplegable con todos los modelos que nos permite encontrar esta herramienta, de todas esas opciones obviamente la elegida es la “Transfer Function Models”.

Una vez seleccionada esta opción nos pide ingresar el número de polos y ceros para el cual deseamos estimar así como también si se lo quiere hacer en tiempo continuo o discreto, para este caso de estudio el tiempo es continuo, el número de polos es 2 y el número de ceros 1.

Con estos datos el software se encarga de hacer los cálculos correspondientes y mostrar los resultados, el resultado de la estimación puede ser tomado como válido si presenta una coincidencia mayor al 80 % con relación a los datos de salida. El resultado de coincidencia obtenido para este estudio se muestra en la Figura 3.7 con un rendimiento del 100% por lo que se la función de transferencia estimada puede ser aceptada para la verificación de la encontrada a través del modelo matemático.

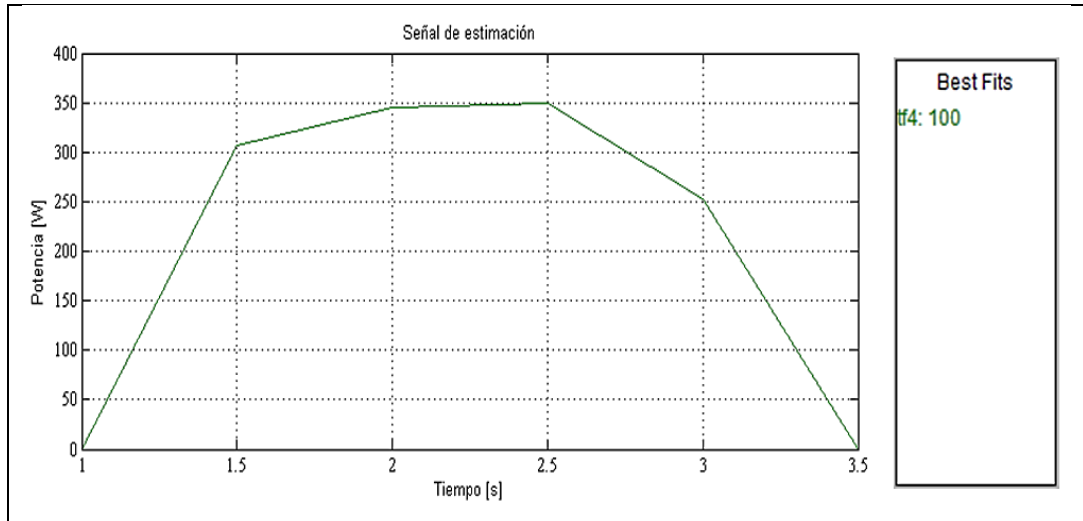


Figura 3. 7 Resultado de la señal de estimación de la función de transferencia.

Fuente: Autor

La función de transferencia generalizada determinada de manera heurística mediante el software Matlab aparece en la expresión (3.9), donde los valores de k_1 , k_2 , k_3 y k_4 dependen de la zona de inducción de la cocina a ser estudiada. Estos valores se detallan en la Tabla 3.1

$$GI(s) = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + k_3 s + k_4} \quad (3.9)$$

Realizando una comparación entre las expresiones (3.8) y (3.9), se puede decir que matemáticamente son equivalentes ya que poseen el mismo grado y número de incógnitas, pero debido a que el objetivo del presente trabajo es construir una función que permita representar el comportamiento de la cocina de inducción, se empleará la primera expresión para los futuros análisis a desarrollarse.

3.2 Simulación de la curva de demanda en horarios específicos

Con la finalidad de simular la curva de demanda para una cocina eléctrica de inducción se empleó la función de transferencia obtenida en (3.8), en donde los valores de inductancia, capacitancia y resistencia fueron reemplazados por los valores que aparecen en

la Tabla 3.1.

TABLA 3. 1 *Valores utilizados para la evaluación de la función de transferencia.*

Parámetro	Valor	Unidad
Inductancia para zona de mayor diámetro	51.9	[μH]
Inductancia para zona de menor diámetro	34.6	[μH]
Capacitancia	30	[μF]
Resistencia del menaje	20×10^{-8}	[Ω/m]

Fuente: Autor.

Los valores correspondientes a la inductancia fueron calculados utilizando la expresión (3.10) [70], tanto para la zona de inducción con mayor y menor diámetro respectivamente. Mientras que el valor de la capacitancia ha sido obtenido de manera directa durante el proceso experimental explicado y el valor de la resistencia del menaje, constituye el del acero consultado en [71].

$$L = 0.394 * \left(\frac{d^2 * n^2}{18d + 40l} \right) \quad (3.10)$$

Dónde:

L : es la inductancia de la bobina en micro Henrios.

d : corresponde al diámetro de la bobina en centímetros.

n : es el número de espiras.

l : es la longitud de la bobina en centímetros.

Otro dato importante obtenido de los ensayos realizados ha sido la determinación del rango de frecuencia del funcionamiento de las cocinas de inducción del plan gubernamental, el mismo que va desde los 25 hasta los 35 kHz.

Todos los datos referidos, fueron empleados para con ayuda del Simulink del programa Matlab desarrollar un bloque que contenga la función de transferencia obtenida. La salida de este bloque corresponde a la corriente que circula por el circuito equivalente analizado.

Debido a que en esta parte del análisis lo que interesa conocer es la potencia consumida

por el equipo, se empleó la expresión (3.11), en la misma que: P representa la potencia activa; V será el voltaje de alimentación, para este caso corresponde una señal sinusoidal de ciclo positivo; I es la corriente obtenida de la función de transferencia, representada como una señal de pulsos y $\cos\varphi$ el factor de potencia, que en este trabajo es un valor constante igual a 1, por facilidad de cálculo.

$$P=V * I * \cos\varphi \quad (3.11)$$

Con estas consideraciones, en la Figura 3.8 se muestra el bloque hecho para el cálculo de la potencia consumida, el mismo que varía para cada nivel de potencia según a la zona de inducción que pertenezcan.

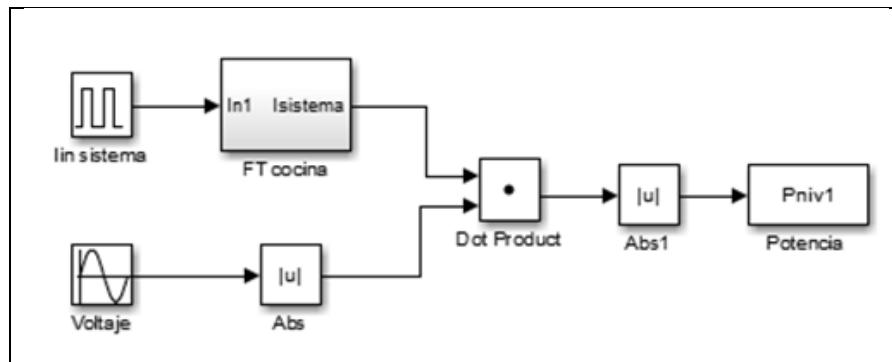


Figura 3. 8 Bloque de la función de transferencia en Simulink para el cálculo de la potencia.

Fuente: Autor

3.2.1 Simulación de curvas de demanda para horarios específicos

Buscando brindar facilidades para la simulación de la demanda de la cocina eléctrica de inducción, se desarrolló en el entorno de programación visual (GUI), con el que cuenta el programa Matlab, una interface que representa a la plancha de una cocina con cuatro zonas de inducción.

En la Figura 3.9 se muestra la interface desarrollada, como se puede ver para cada una de las zonas de inducción se posee: un botón que permite simular el encendido o apagado, así como también un control deslizante con el cual se controla el nivel de potencia, en el que se desea hacer funcionar a cada zona de la cocina.

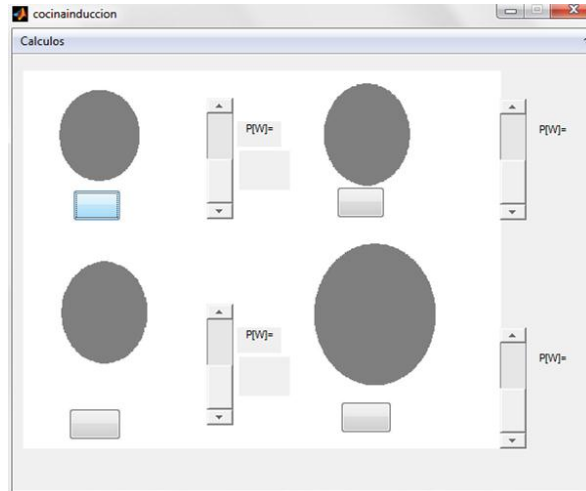


Figura 3. 9 Interface desarrollada en GUI para simulación de uso de la cocina de inducción.
Fuente: Autor

Con esta interface y recurriendo a la ayuda de una ama de casa, se realizaron tres simulaciones donde se buscaba recrear de manera virtual la preparación de las comidas para un día típico en un hogar ecuatoriano conformado por cuatro miembros.

La Figura 3.10 muestra la curva de demanda para el desayuno, en esta comida se simuló el uso de la cocina para la preparación de café con leche y huevos cocidos.

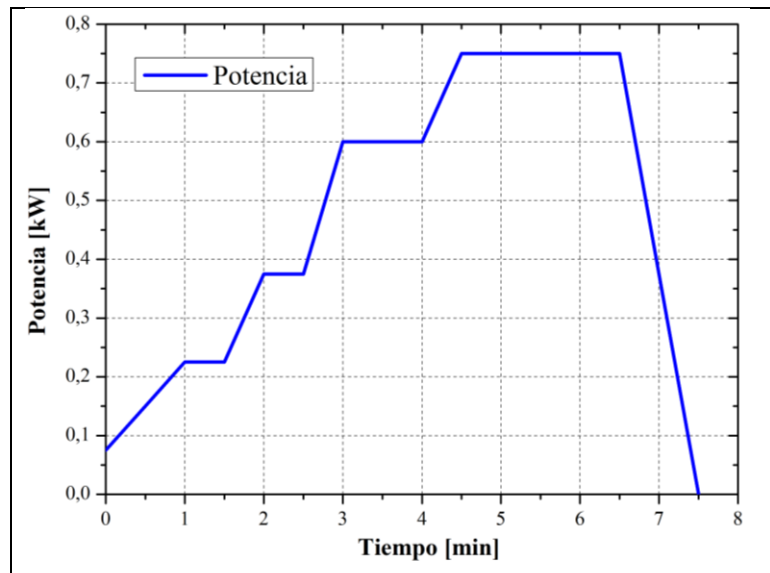


Figura 3. 10 Curva de demanda simulada para un desayuno.
Fuente: Autor

En el caso de los alimentos preparados para la hora del almuerzo, se replicó la cocción

del menú utilizado en los ensayos del trabajo[72], el mismo que consistió en un loco de papas y un plato fuerte conformado por arroz, menestra de lenteja y pollo en salsa de tomate. La curva de demanda para el almuerzo preparado se ilustra en la Figura 3.11.

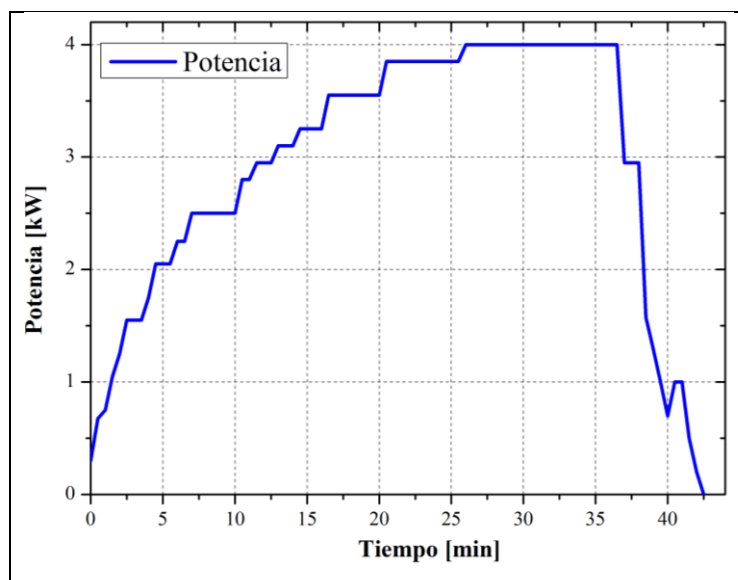


Figura 3. 11 Curva de demanda simulada para un almuerzo.

Fuente: Autor.

Finalmente la curva de demanda correspondiente a la cena se muestra en la Figura 3.12, para este horario se consideró la preparación de café en agua y también el recalentado de los alimentos preparados en el almuerzo.

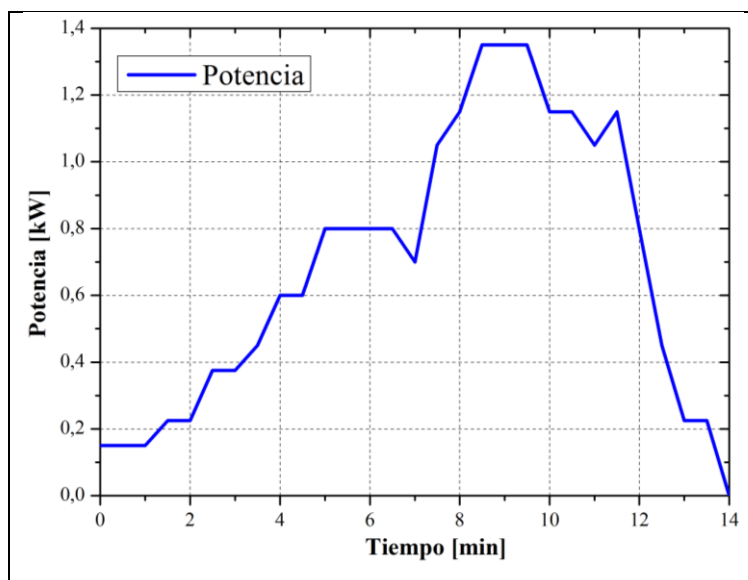


Figura 3. 12 Curva de demanda simulada para la cena.

Fuente: Autor.

3.2.2 Medición del consumo eléctrico de la cocina de inducción

Para la obtención de datos reales del consumo de una cocina de inducción se realizó mediciones durante dos semanas en el hogar de una familia tipo, la misma que está compuesta por cuatro personas y en la cual se preparan dos comidas al día (desayuno y cena), comportamiento característico al de muchas familias que habitan en el lugar donde se pretende implementar la micro red fotovoltaica es decir en la parte norte de la ciudad de Quito D.M.

Las mediciones fueron realizadas en el tablero eléctrico de la residencia por un período de dos semanas, de las cuales durante la primera semana se semana se tomaron datos de parámetros eléctricos como: voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, distorsión armónica (THD) y consumo de energía de todos los equipos eléctricos de ese hogar sin conectar la cocina de inducción, en la segunda semana se repitió la medición de estos parámetros pero esta vez incluyendo una cocina de inducción con una potencia nominal de 4 kW. El equipo utilizado para la toma de datos fue el analizador de energía y de la calidad eléctrica 435 Serie II de marca Fluke.

3.3 Dimensionamiento y diseño de la micro red fotovoltaica.

Antes de empezar con el dimensionamiento de la micro red fotovoltaica con la cual se busca alimentar a la cocina de inducción es importante tener claro la clasificación de los sistemas de generación distribuida y el concepto de lo que es una micro red.

Al momento de realizar la clasificación de los sistemas de generación se debe considerar la cantidad de energía que se necesita suministrar y para el caso de conectarse a una red pública la potencia máxima de ese sistema [53]. Según bibliografía consultada se sugiere la clasificación mostrada en la Tabla 3.2 [73], para este tipo de sistemas de generación eléctrica.

TABLA 3. 2 *Clasificación de sistemas de generación distribuida.*

Tipo de generación distribuida	Potencias
Micro	Desde: 1 W hasta ≤ 5 kW
Pequeña	Desde: $5 \geq$ kW hasta ≤ 5 MW
Mediana	Desde: $5 \geq$ MW hasta ≤ 50 MW

Grande	Desde: $50 \geq$ MW hasta \leq 300 MW
--------	---

Fuente: T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: a definition,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, Apr. 2001.

Una vez conocido el rango de potencia en el cual se encuentra catalogada una micro red, esta puede ser definida como un sistema que abarca gran variedad de generadores distribuidos sin importar la tecnología de estos, además de sistemas de almacenamiento de energía y las cargas a las cuales alimentarán, siendo por este motivo que estos sistemas deben garantizar altos niveles de calidad y confiabilidad [53],[74]. Para el caso de sistemas de micro generación que funcionen con conexión a la red esta se lo hace por lo general a nivel de sistemas de distribución [75]. En la Figura 3.13 se ilustra la definición indicada para una micro red de generación.

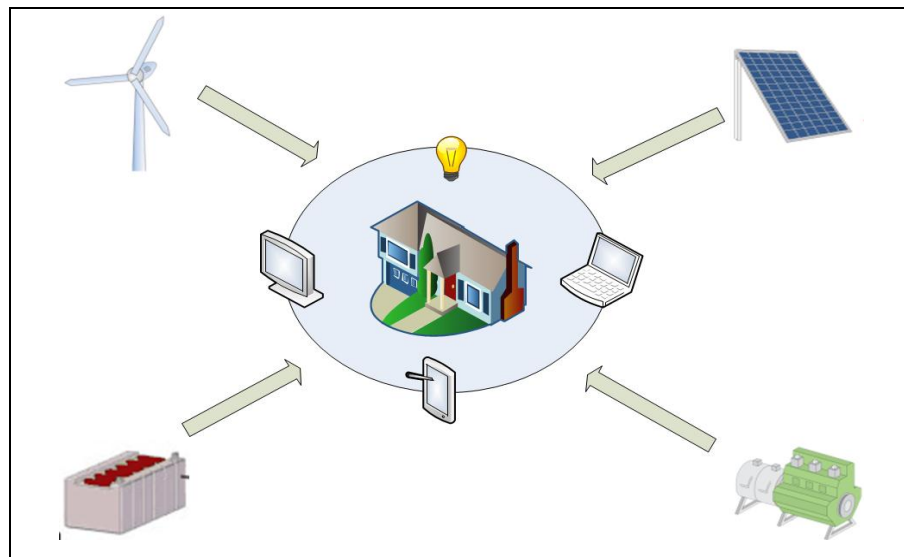


Figura 3. 13 Definición de una micro red de generación eléctrica.

Fuente: Autor

3.3.1 Dimensionamiento de la micro red fotovoltaica

Con la finalidad de realizar el dimensionamiento de la potencia del sistema fotovoltaico, se han considerado los siguientes aspectos:

- Cantidad del recurso solar en el lugar de emplazamiento.
- La carga a ser alimentada (cocina de inducción).

A continuación se encuentra explicado el procedimiento empleado para determinar los valores de cada uno de estos aspectos.

3.3.1.1. *Determinación del recurso solar*

Previo a empezar con la determinación del recurso solar es importante indicar el lugar donde se busca implementar la micro red fotovoltaica, la misma que estaría ubicada en el norte de la ciudad de Quito D.M. más concretamente en el barrio Kennedy en las calles Rafael Bustamante y Gonzalo Zaldumbide (Campus Kennedy de la UPS).

Para la determinación de la cantidad de recurso solar en la ciudad de Quito D.M. se han empleado los datos de radiación global mostrados en el TMY (Typical Meteorological Year)[76], el cual es una base de datos meteorológicos tales como: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, precipitaciones y radiación global que corresponden a cada uno de los doce meses de un año construido, los mismos que son elegidos utilizando métodos estadísticos entre cada uno de los respectivos meses de los años que se han considerado para realizar el análisis. El TMY empleado ha sido elaborado considerando los reportes horarios emitidos por la Secretaria del Ambiente de la ciudad de Quito D.M. en su página web y que corresponden a la estación meteorológica Belisario, la misma que se encuentra ubicada en la parte norte de la ciudad y se han utilizado datos de 6 años (2008 – 2013).

Con los datos de radiación global del TMY, se procedió a realizar un promedio del recurso solar horario para cada uno de los doce meses del año con la finalidad de tener una idea más clara de las horas en la que existe recurso solar e identificar los meses en los cuales se tiene mayor presencia del mismo, estos datos se muestran resumidos en el Anexo B. Además con estos datos también se ha obtenido la energía mensual y anual a producirse en el norte de la ciudad de Quito D.M. y se encuentran resumidos en la Tabla 3.3. en la misma que se aprecia que los meses con mayor radiación son agosto y septiembre, mientras que el mes con menos cantidad de recurso es abril.

TABLA 3. 3 *Radiación global promedio y energía mensual para la ciudad de Quito D.M.*

Meses	Radiación Global promedio diaria [kW/m ² -día]	Energía mensual [kWh]
Enero	4.12	127.67
Febrero	4.20	117.72
Marzo	4.44	137.70
Abril	4.08	122.33

Mayo	4.46	138.16
Junio	4.65	139.47
Julio	4.54	140.73
Agosto	5.49	170.28
Septiembre	5.05	151.64
Octubre	4.92	152.37
Noviembre	4.27	128.07
Diciembre	4.78	148.06

Fuente: Autor

Para el dimensionamiento de los equipos de la micro red fotovoltaica se empleará el método conocido como el del mes peor, el que mismo que consiste en dimensionar los equipos de tal manera que tengan un correcto desempeño en el cual la demanda de energía supera a la energía solar disponible [77]. Para la aplicación de este método basta con conocer los valores promedios mensuales de radiación global diaria sobre un plano horizontal, los mismos que fueron calculados en la segunda columna de la Tabla 3.3 y de la cual se ha llegado a determinar que para los cálculos futuros se deben usar los valores del mes de abril.

3.3.1.2. Determinación de la carga a ser alimentada

Es importante mencionar que la micro red fotovoltaica a ser diseñada en el presente trabajo está destinada a la alimentación exclusiva de una cocina de inducción que cumpla con las especificaciones técnicas estipuladas en el “Plan de Cocción Eficiente”, es decir que tenga una potencia nominal de 4000 W y un voltaje nominal de 220 V [78],[79].

Con la finalidad de obtener la cantidad de energía diaria necesario para este electrodoméstico se ha construido una curva de demanda tipo, en la cual se han utilizado datos reales correspondientes a tres comidas (desayuno, almuerzo y merienda). Para el caso del desayuno y merienda se han usado los datos resultantes de las mediciones hechas en el hogar de la familia tipo que fue explicada en el literal 3.2, mientras que para el almuerzo se han tomado los datos mostrados en el trabajo[72]. En la Figura 3.14 se muestra la curva de demanda tipo para un hogar que emplea a la cocina de inducción como equipo para la cocción de alimentos.

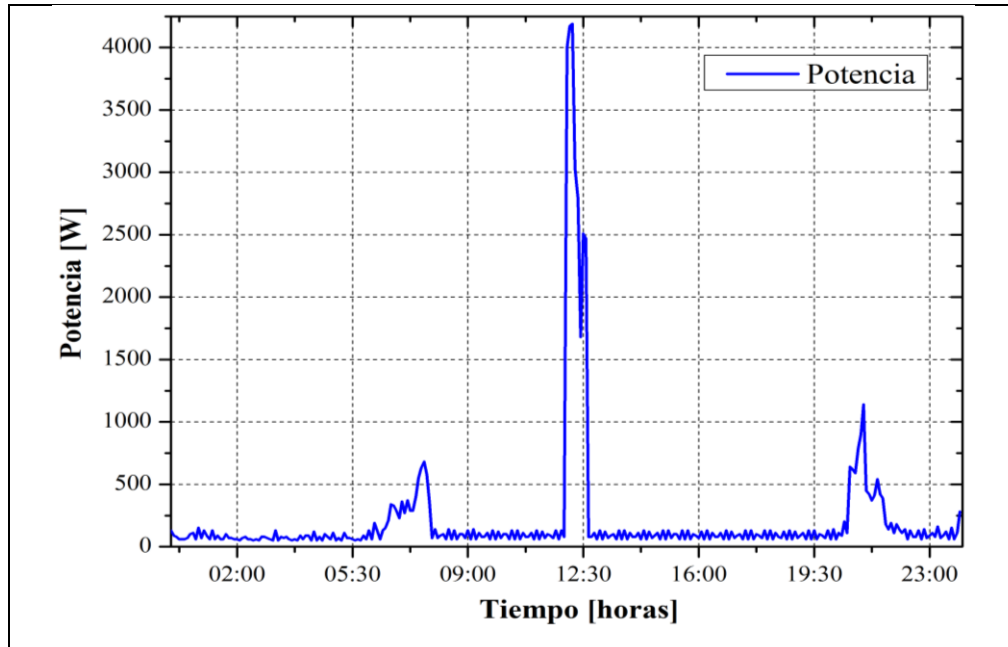


Figura 3. 14 Curva diaria de demanda tipo para un hogar con cocina de inducción.
Fuente: Autor

El cálculo de la energía eléctrica consumida por este equipo se lo obtiene aplicando la expresión (3.12) [72], donde E representa a la energía, Δt constituye la variación del tiempo, n es el número de intervalos de tiempo y P(t) corresponde a la potencia.

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta t * P(t) \tag{3.12}$$

Los resultados obtenidos para cada una de las comidas y total están representados en la Tabla 3.4.

TABLA 3. 4 Energía eléctrica requerida por cada comida en cocina de inducción.

Comida	Energía [kWh]
Desayuno	0.40
Almuerzo	2.28
Merienda	0.52
Total	3.20

Fuente: Autor

3.3.1.3. *Potencia de la micro red de generación fotovoltaica*

Con los datos del recurso solar así como de la energía diaria consumida por la cocina de inducción obtenidos en los literales anteriores, se procederá a calcular la potencia mínima que debe tener la micro red fotovoltaica de alimentación para ello se aplicará la expresión (3.13) [80],[81].

$$P_{min} = \frac{E_D G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) PR} \quad (3.13)$$

Dónde:

P_{min} : Potencia mínima del sistema de generación fotovoltaico.

E_D : Consumo expresado en [kWh/día].

G_{CEM} : Irradiancia en condiciones estándar de medida (CEM), se considera un valor constante de 1 kW/m².

$G_{dm}(\alpha, \beta)$: Valor medio mensual de radiación sobre el plano del generador en [kWh/m²-día].

PR : Eficiencia de la instalación fotovoltaica.

Respecto a la eficiencia del sistema fotovoltaica, al considerar en (3.13) las condiciones estándar de medida se excluye de este cálculo a la eficiencia de los paneles fotovoltaicos por lo que para encontrar el valor de PR se puede usar la expresión (3.14) [82].

$$PR = \{1 - [(1 - \eta_{bat}) + (1 - \eta_{reg}) + (1 - \eta_{inv}) + (1 - \eta_{cond})]\} * \left\{1 - \frac{k_a * N}{P_d}\right\} \quad (3.14)$$

Dónde:

η_{panel} : Eficiencia del panel fotovoltaico.

η_{bat} : Eficiencia de la batería.

η_{reg} : Eficiencia del regulador.

η_{inv} : Eficiencia del inversor.

η_{cond} : Eficiencia de los conductores.

k_a : coeficiente de auto descarga diario para baterías.

N : número de días de autonomía de la instalación fotovoltaica.

P_d : Profundidad de descarga diaria de la batería.

En el desarrollo de este cálculo se han considerado las eficiencias mostradas en la Tabla 3.5 [83], donde constan todos los equipos que componen un sistema de generación fotovoltaico.

TABLA 3. 5 Eficiencia de los equipos constitutivos de un sistema de generación fotovoltaico.

Equipo	Eficiencia [%]
Panel monocristalino	14
Panel policristalino	11
Batería ácido-plomo	66
Batería alcalina-níquel-cadmio	70
Batería de gel	80
Regulador de carga	95
Inversor	90
Conductores	95

Fuente: G. Salazar, “Comparación de la eficiencia entre los sistemas de generación fotovoltaicos conectados a la red y los sistemas aislados,” Universidad Politécnica Salesiana, 2014.

Es importante mencionar que para el cálculo de la eficiencia del sistema se ha considerado un sistema de almacenamiento de energía con baterías de gel con una profundidad de descarga del 30% así como un coeficiente de auto descarga diaria de 0.005 y dado que el sistema busca alimentar a un electrodoméstico en especial se ha considerado una autonomía de 5 horas, con lo cual el rendimiento para este sistema es del 59.79%.

Con este dato la potencia mínima con la que debería contar la micro red de generación fotovoltaica para alimentar a una cocina de inducción es de 1.31 kWp, debido a las especificaciones técnicas de los equipos que se encuentran en el mercado y que forman parte de un sistema fotovoltaico resulta complicado tener una potencia de 1.31 kWp decidiéndose por esta razón realizar el cálculo de estos equipos para una potencia de 1.5 kWp. Con estos datos se procederá a realizar el cálculo de los equipos del sistema fotovoltaico.

3.3.1.4. *Elección del Inversor*

Una vez conocida la potencia del Sistema fotovoltaico, se ha procedido a escoger un inversor que tenga la capacidad de satisfacer la potencia total que se desea generar, para ello se ha consultado la capacidad de los inversores que se pueden encontrar en el medio consultando los catálogos de empresas nacionales dedicadas al montaje y venta de equipos para sistemas de generación con energías renovables. También se ha considerado que desde el punto de vista de la eficiencia es conveniente que el inversor trabaje a plena carga o en un valor mayor al 80% de su capacidad nominal. Las características técnicas del inversor elegido se muestran en la Tabla 3.6. La hoja técnica de este inversor se encuentra en el Anexo C.

TABLA 3. 6 *Datos técnicos inversor.*

Características	Valor
Potencia máxima en CC [W]	1,850
Rango de tensión FV,MPPT	147 – 320
Corriente máxima de entrada [A]	12.6

Fuente: Autor

3.3.1.5. *Cálculo del número de paneles fotovoltaicos*

Después de consultar con algunas empresas del medio local las potencias nominales de los paneles fotovoltaicos que disponen para la venta al público, se ha decido emplear paneles monocristalinos de 190 Wp cuyas hoja de datos técnicos se muestra en el Anexo D, además para el diseño de este sistema fotovoltaico se ha considerado que el ángulo de inclinación de los paneles será de 10° esto principalmente debido al lugar donde se realizará la implantación del sistema, muy próximo a la línea ecuatorial, la elección de este valor también ayudará a la evacuación de agua lluvia y limpieza de suciedades que puedan caer sobre el panel.

3.3.1.5.1 *Determinación del conexionado de paneles*

Con este fin se empleará la metodología empleada en [84] y los datos que aparecen en la Tabla 3.7 en la que se resumen datos técnicos del panel seleccionado así como datos meteorológicos obtenidos del TMY. Estos datos servirán para calcular la temperatura

máxima y mínima a la cual será capaz de operar el panel, de igual manera se realizara el cálculo de voltajes máximo y mínimo para la máxima potencia del panel elegido, este último cálculo se lo realiza con la finalidad de garantizar la operación optima del panel en condiciones extremas de carga además que de esta manera se cuida la vida útil e integridad física del panel fotovoltaico.

TABLA 3. 7 Datos técnicos del panel y datos meteorológicos.

Parámetro	Valor	Fuente
Pp: Potencia Pico del Panel [W]	190	Fabricante del Panel
Va: Tensión de aislamiento IEC [V]	1,000	Fabricante del Panel
TONC [°C]	45	Fabricante del Panel
dVoc / dT [% / °C]	0.34	Fabricante del Panel
dPmp / dT [(% / °C)]	0.39	Fabricante del Panel
Tmin: Temperatura ambiente mínima [°C]	7.12	Valor obtenido del TMY
Tmax: Temperatura ambiente máxima [°C]	22.41	Valor obtenido del TMY
Irmax: Irradiación máxima	1,117.39	Valor obtenido del TMY
Irmin: Irradiación mínima	0	Valor obtenido del TMY
Voltaje a máxima potencia [V]	36.5	Fabricante del Panel

Fuente: Autor

a) *Cálculo de temperatura máxima y mínima del panel*

Los valores correspondientes a estas temperaturas pueden ser obtenidos al aplicar la expresión (3.15) [84],[85].

$$T_p = T_a + \frac{TONC - 20}{800} * I \quad (3.15)$$

Dónde:

T_p : Temperatura del panel.

T_a : Temperatura ambiente (máxima y mínima).

$TONC$: Temperatura normal de operación del panel seleccionado dada por el fabricante.

I: Irradiación solar (máxima y mínima).

Se tiene que para los paneles seleccionados y con las condiciones climáticas descritas la $T_{pmax} = 57.32 \text{ °C}$ y la $T_{pmin} = 7,12 \text{ °C}$.

b) Cálculo del voltaje máximo y mínimo a máxima potencia del panel

Obtener estos valores es importante debido a que el voltaje que puede suministrar un panel está estrechamente relacionado con su temperatura de operación, es así que el rendimiento del panel fotovoltaico es inversamente proporcional a la temperatura que opera, para poder obtener este valor se utiliza el dato de variación del voltaje de salida con la temperatura (dV/dT), provisto por el fabricante en la hoja de datos técnicos del panel fotovoltaico. Las expresiones (3.16) y (3.17) permiten calcular los voltajes máximo y mínimo de máxima potencia respectivamente.

$$V_{max_mp} = \left[(T_s - T_{pmin}) * \frac{dV}{dT} \right] + V_{maxp} \quad (3.16)$$

$$V_{min_mp} = V_{maxp} - \left[(T_{pmax} - T_s) * \frac{dV}{dT} \right] \quad (3.17)$$

Dónde:

V_{max_mp} : Voltaje máximo de máxima potencia.

V_{min_mp} : Voltaje mínimo de máxima potencia.

T_s : Temperatura estándar (25 °C).

T_{pmax} : Temperatura máxima del panel.

T_{pmin} : Temperatura mínima del panel.

V_{max} : Voltaje a máxima potencia.

Considerando un valor de 0.052 para la variación del voltaje de salida con la temperatura (dV/dT), se tiene que $V_{max_mp} = 37.42 \text{ °C}$, mientras que $V_{min_mp} = 34.82 \text{ °C}$.

c) Determinación del número de paneles en serie (N_{ps}) y en paralelo (N_{pp})

En el caso de los paneles a conectarse se consideran los siguientes aspectos:

- Que el voltaje máximo de máxima potencia del número de paneles en serie tenga un valor menor o igual al voltaje máximo en el punto de seguimiento de máxima potencia del inversor, lo cual se encuentra expresado en (3.18) [84].

$$N_{ps} * V_{\max_mp} \leq V_{\max} \text{ del MPPT del inversor} \quad (3.18)$$

- Que el voltaje mínimo de máxima potencia del número de paneles en serie tenga un valor mayor o igual al voltaje máximo en el punto de seguimiento de máxima potencia del inversor, lo cual se encuentra expresado en (3.19) [84].

$$N_{ps} * V_{\min_mp} \geq V_{\max} \text{ del MPPT del inversor} \quad (3.19)$$

De esta manera tenemos que: $4 \leq N_{ps} \leq 8$.

Mientras que para determinar el número de paneles en paralelo se considera que: la corriente de corto circuito del número de paneles en paralelo sea menor o igual a la corriente máxima de entrada del inversor, esto se encuentra expresado en (3.20) [18].

$$N_{pp} * I_{cc_p} \geq I_{\max} \text{ del inversor} \quad (3.20)$$

Donde se obtiene que: $N_{pp} \leq 2$.

Con los valores obtenidos y para determinar el arreglo óptimo de paneles en serie y paralelo se construye un conjunto de posibilidades como el que se muestra en la Tabla 3.8. En este arreglo se procede a eliminar aquellos arreglos cuya potencia supere a la potencia de entrada del inversor (datos resaltados con rojo).

TABLA 3. 8 Conjunto de posibilidades para el arreglo de paneles en serie – paralelo.

Arreglos			Potencia del Arreglo [W]		
Nps/Npp	1	2	Nps/Npp	1	2
4	4	8	4	646	1292

5	5	10	5	807,5	1615
6	6	12	6	969	1,938
7	7	14	7	1,130.5	2,261
8	8	16	8	1,292	2,584

Fuente: Autor

De los valores de la Tabla 3.8 se puede determinar en la parte izquierda los arreglos posibles que se puede tener, de igual manera en la parte de la derecha se puede encontrar la potencia de entrada al inversor en CC que se puede obtener para cada uno de los arreglos. Para el cálculo de esta potencia se ha empleado un factor de ajuste igual a 0.85 que es aplicable a instalaciones fotovoltaicas en Ecuador y que relaciona la potencia del campo solar (PCS) con la potencia del inversor [84].

Tomando en cuenta que la potencia de entrada para el inversor seleccionado es de 1,850 W, se ha decidido utilizar el arreglo que llegue a una potencia próxima a esta y cuyas características se indican en la Tabla 3.9.

TABLA 3. 9 Arreglo elegido paneles en serie - paralelo.

Nps	Npp	Tot.paneles	Pp [kW]	Pin al inversor [kW]	P nominal inversor [kW]	% Carga
5	2	10	1.9	1.62	1.85	87.29

Fuente: Autor

La idoneidad del arreglo elegido se puede comprobar verificando que la corriente de entrada al inversor no supere su potencia máxima de entrada y también que el voltaje de los arreglos no sea mayor que la tensión admisible del inversor [84]. Para esto se debe calcular el voltaje máximo en circuito abierto (V_{camax}) del campo solar a la temperatura ambiente mínima en la que funcionará con la expresión (3.21), donde V_{ca} es el voltaje de circuito abierto del panel.

$$V_{camax} = \left[(T_s - T_{pmin}) * \frac{dV}{dT} \right] + V_{ca} \quad (3.21)$$

En la Tabla 3.10 se ha realizado la comprobación del arreglo seleccionado tanto en

voltaje como en corriente, en ella se puede apreciar que el voltaje máximo en circuito abierto de los arreglos es 227.15 V es decir que se encuentra dentro del rango de tensión FV, MPPT (147-320 V) y la corriente máxima del arreglo es menor que la máxima de entrada del inversor (12.6 A).

TABLA 3. 10 Comprobación del arreglo elegido paneles en serie – paralelo.

N _{ps}	N _{pp}	Comprobación de voltaje		Comprobación corriente	
		V _{camax} [V]	V _{camax_arreglo} [V]	I _{cc_panel} [A]	I _{max_arreglo} [A]
5	2	45.42	227.15	5.5	11

Fuente: Autor

d) Determinación del área necesaria para el generador fotovoltaico

Previo a conocer el área necesaria para la implantación del sistema fotovoltaico, es importante determinar el número total de arreglos a instalarse para esto se debe dividir el número total de paneles para el número de paneles por cada arreglo, para el caso de este sistema se ha determinado que se tendrán 2 arreglos.

Además se debe considerar que los paneles se instalarán con la mayor dimensión hacia arriba y que la separación entre las filas de cada arreglo debe ser igual a 2.5 veces la altura proyectada por el panel para evitar que se generen sombras sobre las filas posteriores y de esta manera disminuya el rendimiento del sistema fotovoltaico [84],[77] y también que la inclinación de instalación es de 10°. Estas consideraciones se encuentran ilustradas en la Figura 3.15.

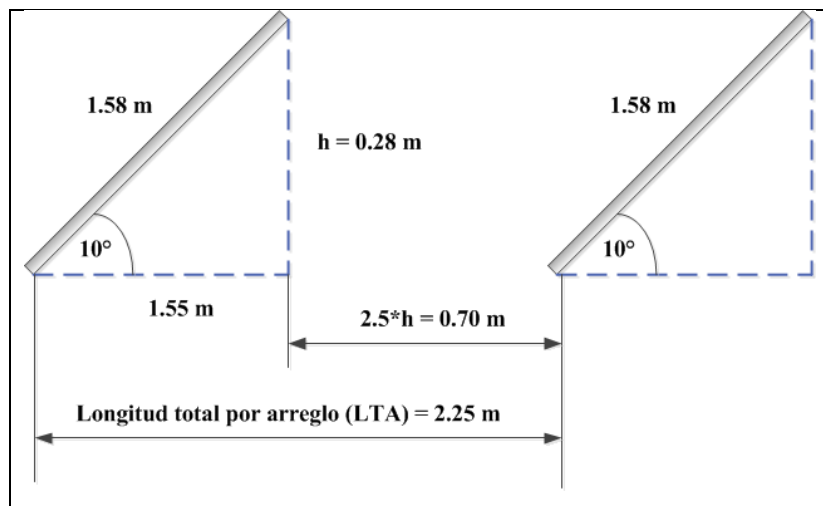


Figura 3. 15 Separación entre arreglos de paneles fotovoltaicos.

Fuente: Autor

Para dimensionar el largo útil necesario se empleara la expresión (3.22), donde LTA es la longitud total por arreglo (2.5xh) y para el cálculo del ancho útil se emplea (3.23). Al realizar estos cálculos se tiene que para la instalación de un sistema de generación fotovoltaica con las características descritas es necesario un área igual a 22.5 m², es decir un terreno rectangular de un largo útil de 4.5 m por un ancho útil de 5.

$$Largo\ útil = Filas * LTA \quad (3.22)$$

$$Ancho\ útil = Paneles * ancho\ del\ panel \quad (3.23)$$

3.3.1.6. Determinación de la capacidad del banco de baterías

Como se manifestó antes se busca dar una autonomía al sistema de máximo 5 horas, tiempo más que necesario para la preparación de alimentos en horarios en los cuales la radiación solar sea baja o inexistente, este cálculo se lo hará empleando la expresión (3.24) [82]. Donde C_{bat} es la capacidad del banco de baterías, E es la energía real consumida, N corresponde el número de días de autonomía, V será el voltaje nominal de la batería y P_d es la profundidad de descarga de la batería seleccionada.

Para el sistema descrito la capacidad del banco de baterías es de 186.6 Ah, considerando las características técnicas de las baterías descritas en el Anexo E

$$C_{bat} = \frac{E * N}{V * P_d} \quad (3.24)$$

3.3.1.7. Elección del regulador

Para realizar la elección del regulador, se ha partido de la corriente de corto circuito (I_{sc}) de los paneles a emplearse, el mismo que será multiplicado por el número total de paneles (NP) determinados para este sistema. Esto se encuentra resumido en la expresión (3.25) [85]. La corriente a considerar es de 55 A, en el Anexo F se encuentra las especificaciones técnicas del inversor considerado.

$$I_{reg} = I_{sc} * NP \quad (3.25)$$

3.3.1.8. Dimensionamiento de conductores para la instalación fotovoltaica

Para el dimensionamiento de los conductores del sistema fotovoltaico se ha dividido al mismo en dos secciones, la primera es todas aquellas conexiones que se las hará en corriente continua en las cuales se ha determinada que la variación de corriente máxima permitida sea del 1% del voltaje nominal, para ello se ha empleado la expresión (3.26).

$$sección = \frac{2 * L * I}{\Delta V * V * k} \quad (3.26)$$

Dónde:

L : representa la longitud del cable.

I : es la corriente.

V : es el voltaje del circuito.

ΔV : es la caída de voltaje máxima.

k : es la constante de conductividad del cobre 56 [m/(Ω *mm²)].

Una vez calculada la sección del conductor es importante comprobar que la caída de voltaje real es menor a la tolerable. Para ello se aplicará la expresión (3.27), donde la sección real representa a la sección normalizada del cable escogido que aparece en los catálogos de los fabricantes. En el Anexo G se encuentra el catálogo de conductores consultado.

$$\Delta V_{real} = \frac{2 * L * I}{Sección\ real * V * k} \quad (3.27)$$

Para el caso de los circuitos en corriente alterna se ha considerado una variación máxima de voltaje del 3% de la tensión nominal y para determinar la sección de los conductores se ha empleado (3.28), mientras que la comprobación de la variación del voltaje se lo hará con la expresión (3.29), considerando un factor de potencia (Fp) igual a 0.85.

$$Sección = \frac{\sqrt{3} * L * I * Fp}{\Delta V * V * k} \quad (3.28)$$

$$\Delta V_{real} = \frac{\sqrt{3} * L * I * Fp}{Sección\ real * V * k} \quad (3.29)$$

En la Tabla 3.11 se muestran las secciones de los conductores seleccionados para cada tramo del sistema fotovoltaico.

TABLA 3. 11 Selección de conductores por tramos para el sistema fotovoltaico.

Tramo	Calibre	ΔV Real
Paneles fotovoltaicos hasta tablero de CC	AWG 14	0.414
Tablero CC al inversor	AWG 4	0.489
Inversor hacia el tablero de transformación	AWG 12	1.81
Inversor-regulador hacia el tablero de transformación	AWG 12	2
Conexión banco de baterías	AWG 4	0.489

Fuente: Autor

3.3.1.9. Dimensionamiento de protecciones

Con los datos anteriores se han determinado las protecciones necesarias para cada tramo del sistema fotovoltaico, los mismos que se encuentran resumidos en la Tabla 3.12. Es importante mencionar que en el Anexo H se encuentra el diagrama unifilar del sistema propuesto.

TABLA 3. 12 Protecciones del sistema fotovoltaico.

Elemento	Cálculo	Protección
Fusible arreglo de paneles fotovoltaicos	Ifusible = 1.2*Icc del panel	10 A
Seccionador arreglo de paneles fotovoltaicos	Iseccionador = 1.2* N.- de ramales*Icc del panel	15 A; 2 polos
Interruptor magneto térmico inversor	I _{max} = 1.2*(P _{inv} /V)	20 A; 2polos

Interruptor magneto térmico inversor-regulador	$I_{max} = 1.2 * (P_{inv}/V)$	50 A; 2 polos
---	-------------------------------	---------------

Fuente: Autor

3.3.2 Diseño de la micro red fotovoltaica

La configuración a implementarse en la micro red fotovoltaica propuesta es la mostrada en los trabajos [53],[86], conocida como sistema CA acoplado en el cual la independencia del sistema de generación fotovoltaica con la del sistema de almacenamiento es total, cada uno de estos sistemas contará con su propio inversor. Esto permite dimensionar el banco de baterías independientemente de la potencia generada. Con este tipo de configuración se puede tener un sistema más robusto y con una interconexión más fácil con otras fuentes de generación, para el caso del sistema propuesta será la red de distribución de una empresa eléctrica. Este tipo de configuración se la muestra en la Figura 3.16.

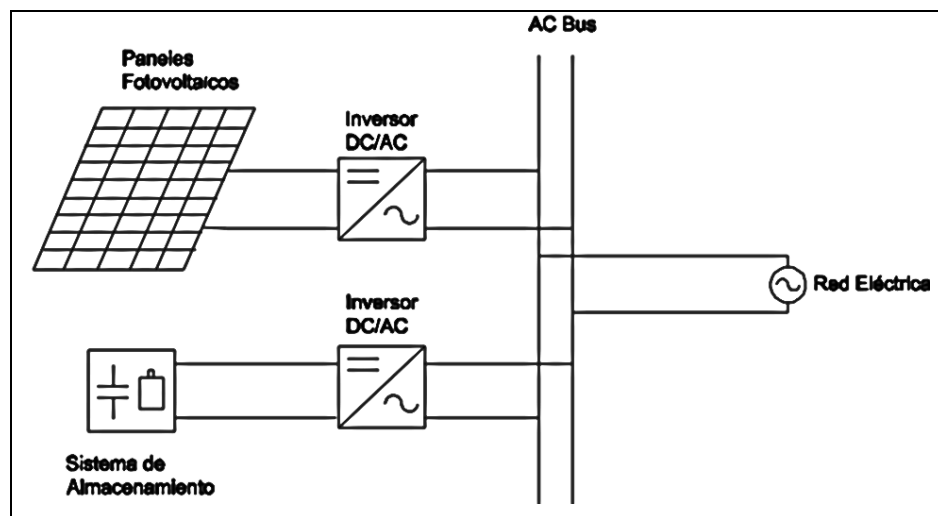


Figura 3. 16 Esquema de un sistema de generación fotovoltaica con configuración AC acoplado.

Fuente: A. Riofrio and D. Carrión, “Approach and Deployment of Distributed Generation. State-of-art Based on Induction Cooker System,” in *ANDESCON 2014*, 2014.

El diseño final de la micro red fotovoltaica propuesta, aplicando la configuración explicada y con los equipos seleccionados, se muestran en la Figura 3.17.

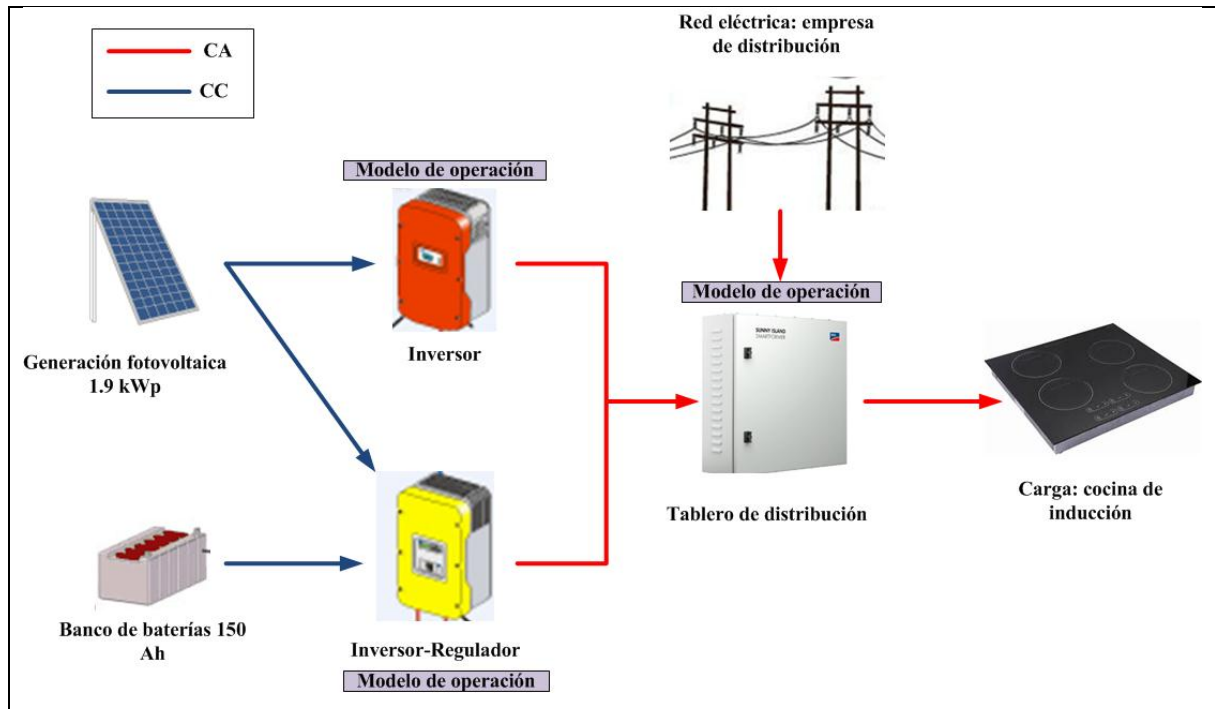


Figura 3. 17 Esquema de micro red fotovoltaica propuesta.
Fuente: Autor

3.4 Modelo de operación para la energía producida por la micro red fotovoltaica

Mediante la aplicación de un modelo de operación a la micro red fotovoltaica se busca principalmente tener un mejor manejo de la energía consumida, un control más preciso de la producción y los consumos; para de esta forma tratar de depender en menor medida de la energía de la red pública.

El modelo de operación propuesto, pone énfasis en la administración de la cantidad de energía producida por el sistema fotovoltaico y para ello se ha partido de los conceptos de:

- Autoconsumo instantáneo: corresponde a la energía entregada directamente por el sistema fotovoltaico a los equipos conectados a este. El nivel de abastecimiento dependerá de la potencia del sistema fotovoltaico, condiciones climatológicas y el perfil de consumo de la carga. Para el caso puntual de la cocina de inducción se puede incluir a las costumbres culinarias de las personas.
- Autoconsumo con acumulación: constituye la energía almacenada proveniente del sistema fotovoltaico en los periodos donde no existe autoconsumo instantáneo, con el objetivo de alimentar a la carga en horas de la tarde o noche y en horas

muy tempranas de la mañana.

Asimismo este modelo de operación procura limitar el acceso a la energía proveniente de los sistemas públicos de distribución eléctrica, recurriendo a estos solo para suplir los picos de demanda en casos extremos y también limita la inyección de energía sobrante a la red debido a la falta de incentivos que existe en el país.

El modelo de operación propuesto se lo ha dividido en dos segmentos, la operación del sistema durante el primero de ellos se lo detalla a continuación:

- Si la carga a ser alimentada se encuentra apagada, la primera acción del sistema propuesto será: consultar o verificar el estado de carga del banco de baterías (C_{bat}), si este estado se encuentra entre $0\% \leq C_{bat} < 100\%$, el sistema enviará a encender al inversor-regulador, hasta que las baterías alcancen el 100% de su carga. Una vez alcanzado este valor, el sistema se encarga de apagar el inversor-regulador y debido a la ausencia de una carga a ser alimentada, se limita la potencia de generación del sistema fotovoltaico al 10% de su capacidad nominal. Siendo esta potencia generada la que se entrega al sistema eléctrico de distribución público al cual está conectado la red fotovoltaica.

El segundo segmento en el cual actúa el modelo de operación, es cuando la carga a ser alimentada se encuentra encendida, aquí se ha previsto tres escenarios, los mismos que dependerán de la capacidad de generación que tenga el sistema fotovoltaico y se detallan a continuación:

- Si la capacidad de generación del sistema fotovoltaica es menor al 30% de la capacidad nominal del sistema, el modelo de operación verificará si la hora del día se encuentra entre las 17:00 h y 20:35 h, en el caso de estar en este intervalo de tiempo la potencia de la carga será alimentada en su totalidad por potencia de la red eléctrica de distribución.

Mientras que para el caso contrario, la primera acción a realizar por el modelo de operación será consultar el estado de carga de las baterías, si este se encuentra en el rango de entre el 30% y 100%, se alimentará a la carga con la potencia

proveniente del sistema fotovoltaico y el banco de baterías, para el caso contrario se empleará la potencia del sistema fotovoltaico y la de la red de distribución.

Para el caso puntual, donde la potencia de la carga supere a la potencia del sistema de generación más la potencia del banco de baterías, se suplirá este pico con la red de distribución.

- Si la capacidad de generación del sistema fotovoltaico, está entre el 30% y el 80% de la capacidad nominal del sistema, el modelo propuesto asigna directamente esta potencia para la alimentación de la carga, en el caso que la potencia de la carga sea mayor a la potencia generada, el modelo comprobará el estado de carga de las baterías y de encontrarse entre el 30% y 100% de carga, utilizará esta potencia también para alimentar la carga, caso contrario se recurrirá a la red de distribución.

De igual manera que en el primer escenario, si la carga es mayor que la potencia de generación más la potencia de las baterías se suplirá este excedente con potencia de la red pública.

- Si la potencia de generación del sistema fotovoltaico, es superior al 80% de la capacidad nominal del sistema, se procede exactamente igual que en el escenario anterior, pero en el caso que la potencia de la carga sea menor a la de generación, el modelo propuesta consulta el estado tanto del banco de baterías como la potencia de la carga, donde si la potencia de la carga constituye entre el 20% o el 45% de la potencia de generación del sistema y la carga de las baterías es menor al 100%, se encenderá el dispositivo inversor-regulador hasta cargar la carga completa en las baterías.

Mientras que si la potencia de la carga tiene un valor menor al 20% de la potencia nominal del sistema fotovoltaico y el banco de baterías se encuentra completamente cargado, el modelo de operación propuesto en este trabajo se encargará de limitar la potencia de generación del sistema fotovoltaico al 15% de la capacidad nominal y entrega esa potencia a la red pública de distribución de electricidad.

El detalle del modelo de operación propuesto se lo puede apreciar en el diagrama de flujo mostrado en el Anexo I.

CAPÍTULO IV

HORAS PICO DE LA CURVA DE DEMANDA DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN Y FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA MICRO RED FOTOVOLTAICA

El último capítulo del presente estudio está destinado a mostrar los efectos ocasionados en las redes de distribución al incluir un equipo como la cocina de inducción en el hogar, para ello en la primera etapa del mismo se ha definido el número de picos de carga y los periodos de tiempo en los que se producen durante el día debido al uso de este electrodoméstico.

Conocidos los picos de demanda se ha buscado eliminar o atenuar los mismos mediante el uso del sistema fotovoltaico diseñado en el capítulo III, para ello en la segunda parte de este capítulo se desarrolló el modelado de la micro red eléctrica propuesta. Este modelo se utilizó para realizar simulaciones de la energía aportada por el sistema para la alimentación de la cocina, en los meses de mayor y menor recurso solar.

La tercera parte de este capítulo está destinada a mostrar el porcentaje de liberación en las redes de distribución gracias al uso de la generación distribuida aplicada a la alimentación de cargas recurrentes. Para terminar este capítulo y también el estudio desarrollado se ejecutó un análisis de factibilidad económico para la implementación del sistema propuesto, considerando los ahorros en el uso de GLP y electricidad proveniente de la red pública así como el aporte en la reducción de emisiones nocivas para el medio ambiente.

4.1 Análisis de las horas pico de la curva de demanda

La rápida evolución tecnológica a la que están expuestos los equipos eléctricos y electrónicos en la actualidad ha provocado que en los últimos años se produzca una rápida migración tecnológica en los hogares a nivel mundial, nuestro país no ha estado exento de esta migración y es así que en los últimos años la demanda de energía eléctrica a nivel residencial se ha incrementado debido a la inclusión de nuevos electrodomésticos.

El incremento de un nuevo dispositivo eléctrico dentro de una residencia, comercio o

industria modificará sin duda su perfil de consumo eléctrico. Dependiendo de la función a desempeñar por el dispositivo se puede determinar su horario de funcionamiento y con ello determinar tanto el impacto en consumo de energía desde la red pública como el costo económico por el pago de este servicio.

En el caso puntual de la inclusión de una cocina eléctrica de inducción, al tratarse de un electrodoméstico que está destinado a ser empleado para la preparación de alimentos hace que su horario de uso este directamente relacionado con las costumbres alimenticias de las familias que adopten esta tecnología. Utilizando la curva de demanda tipo para un hogar con cocina de inducción que se obtuvo en el capítulo anterior se puede determinar que este equipo tiene tres picos de demanda que coinciden con las horas de preparación de las tres comidas principales diarias como lo son: el desayuno, el almuerzo y la cena. La curva de demanda tipo también ayuda a identificar que los picos del medio día y la noche son los de mayor intensidad y duración respectivamente. En la Figura 4.1 se ilustran los picos de demanda para la curva construida.

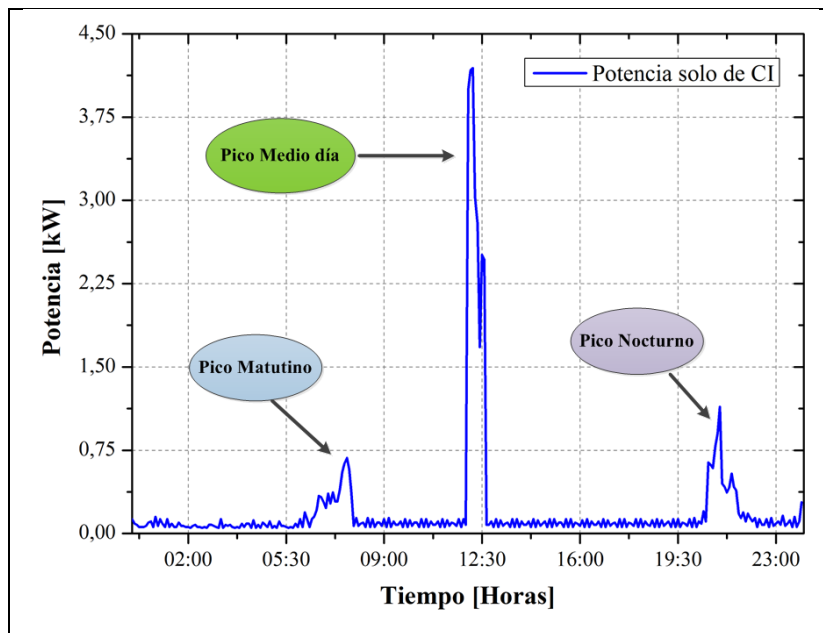


Figura 4. 1 Picos de la curva de demanda tipo de una cocina de inducción.
Fuente: Autor.

Una vez identificados los picos de demanda durante el funcionamiento de la cocina de inducción es importante también determinar los periodos de tiempo durante los cuales la cocina de inducción funciona en potencias máximas, para de esta manera poder cuantificar su consumo energético, en la Tabla 4.1 se resumen el tiempo de duración de cada uno de

estos periodos de tiempo para la curva de demanda tipo. Es importante mencionar que estos valores son referenciales y corresponde al de una familia con las características explicadas en el capítulo anterior.

TABLA 4. 1 *Tiempos de operación a máxima potencia para una cocina de inducción.*

	Tiempo [min]
Pico matutino	≈ 10
Pico del mediodía	≈ 42
Pico nocturno	≈ 15

Fuente: Autor

4.1.1 Picos de demanda antes y después del uso de la cocina de inducción

Después de conocer los picos de demanda que se presentan al hacer uso de una cocina de inducción es conveniente realizar una comparación con la curva de demanda antes de la conexión de este equipo en la casa de la familia tipo considerada para el desarrollo de este estudio. Esta comparación permitirá conocer los periodos en los cuales aumentará el consumo de energía eléctrica para esta familia gracias a la inclusión de la cocina eléctrica de inducción, lo cual representará la cantidad de energía extra a ser suministrada por la red de distribución pública.

La Figura 4.2 muestra las dos curvas de demanda, en la cual se puede apreciar claramente como en horas del mediodía se incrementa el mayor pico de consumo en relación a antes de empezar a usar la cocina de inducción. En esta imagen también se puede apreciar que antes de conectar la cocina, este hogar tiene un comportamiento en el cual presenta solo dos picos de demanda, los mismos que se presentan en horas de la mañana por lo general después de las 6:00 h hasta aproximadamente las 9:00 h y en la noche desde 20:35 hasta las 23:00 más o menos, mientras que en el resto de horas se tiene un consumo casi constante que en su mayoría podría corresponder al consumo en “stand-by” de los electrodomésticos conectados.

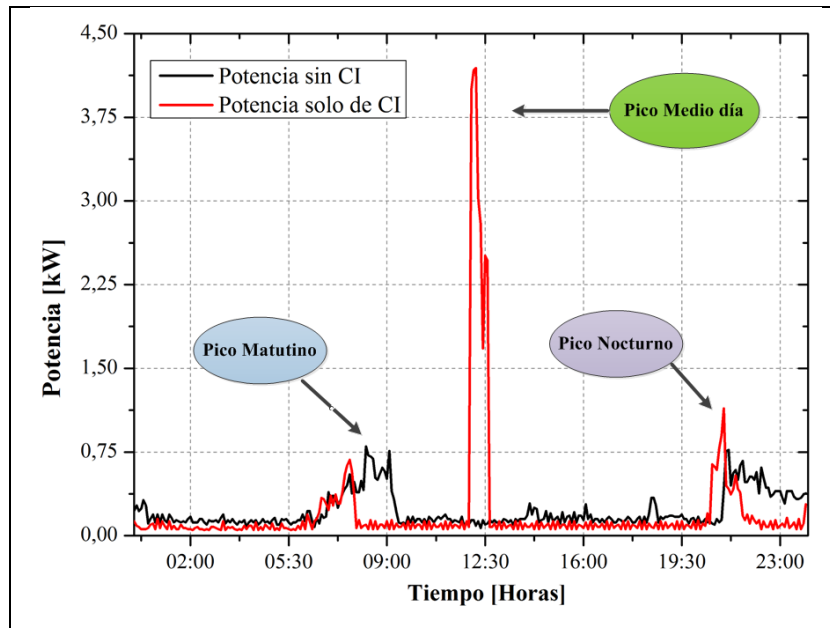


Figura 4. 2 Curvas de demanda del consumo de potencia de la cocina de inducción y sin cocina de inducción.

Fuente: Autor.

4.1.2 Curva de demanda total para un hogar con cocina de inducción

Conocer la curva de demanda total de un hogar que ha adoptado a la cocina de inducción como principal tecnología para la cocción de alimentos toma relevancia principalmente para las empresas de distribución, con la finalidad de verificar si las capacidades de los equipos que conforman sus redes pueden satisfacer la demanda excedente ocasionada por la inclusión de estos nuevos equipos, los mismos que nunca fueron considerados al momento de diseñar muchas de las redes de distribución.

En la Figura 4.3, se ilustra la curva de demanda total para el hogar de la familia tipo, la misma que está constituida por la demanda de la cocina de inducción más el consumo del resto de electrodomésticos conectados en este hogar. Esta curva fue obtenida de las mediciones realizadas, de la cual se puede desprender que las horas pico de la mañana y la noche además de aumentar la cantidad de potencia necesaria también aumentan el tiempo de consumo, además de que como se hizo notar en los enunciados anteriores se incorpora un nuevo horario pico en el mediodía que justamente es el de mayor consumo de potencia.

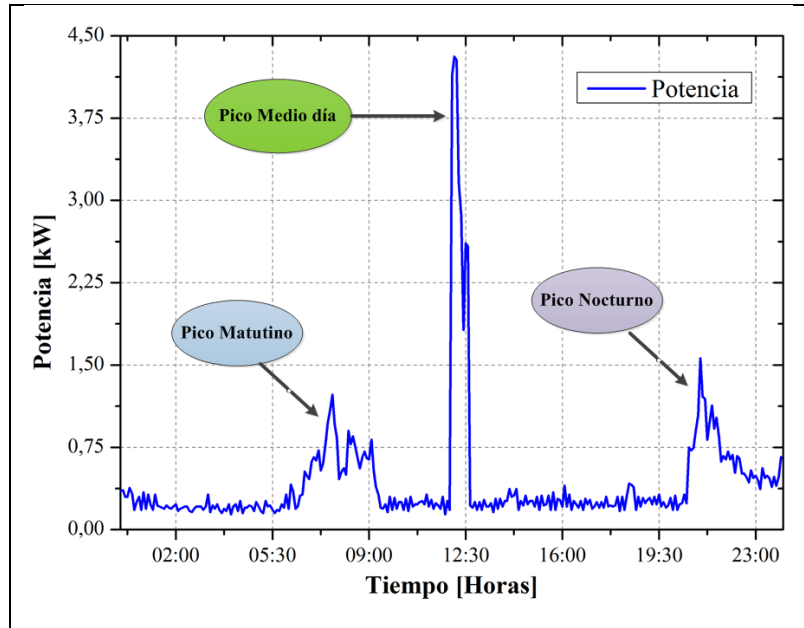


Figura 4. 3 Curva de demanda total para un hogar con cocina de inducción.
Fuente: Autor.

De la figura también es posible identificar los posibles horarios picos que se presentarían por la inclusión de cocinas eléctricas de inducción a las redes de distribución eléctrica en nuestro país, estos valores se muestran en la Tabla 4.2.

TABLA 4. 2 Posibles horarios pico para un hogar con cocina de inducción.

	Horario
Pico matutino	Desde las 6:00 h hasta las 9:30 h
Pico del mediodía	Desde las 11:45 h hasta las 13:00 h
Pico nocturno	Desde las 19:45 h hasta las 23:00 h

Fuente: Autor

4.2 Evaluación del desplazamiento de los picos de carga debido al uso de energía eléctrica producida por la micro red fotovoltaica

Una vez identificado que el horario con mayor requerimiento de energía durante el funcionamiento de la cocina de inducción es el del mediodía, se ha decidido emplear un micro red fotovoltaica que cuente con un sistema de almacenamiento de energía, la misma que fue dimensionada y diseñada en el capítulo 3, para alimentar a esta carga.

Con el sistema propuesta se busca cubrir casi en su totalidad el consumo diario requerido por la cocina de inducción, al hacer uso de un recurso renovable tan impredecible como lo es la energía solar es importante contar con un modelo de operación como el propuesto en apartado 3.4 del capítulo anterior aplicado a este sistema, para de esta manera garantizar la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico a la carga.

4.2.1 Modelización de la micro red fotovoltaica

Para evaluar los resultados que se pueden obtener aplicando el sistema propuesto se ha realizado la modelización del mismo en la plataforma Simulink del programa Matlab, para el desarrollo de este sistema se ha considerado los modelos de cada uno de los elementos que conforman el sistema y que a continuación se detallan.

4.2.1.1. Panel fotovoltaico

El modelo matemático empleado para representar el comportamiento del panel fotovoltaico en este sistema es el que se muestra en (4.1) [87].

$$P_{PV} = P_{SCT} * \frac{G_{ING}}{G_{SCT}} * [1 + k(Tc - Tr)] \quad (4.1)$$

Dónde:

P_{PV} : representa la potencia generada por el panel fotovoltaico.

P_{SCT} : es la potencia del panel en condiciones estándar.

G_{ING} : es el valor de la radiación instantánea.

G_{SCT} : es el valor de la radiación solar en condiciones estándar.

k : corresponde al coeficiente de temperatura del panel.

Tc : es la temperatura del panel en condiciones estándar.

Tr : corresponde el valor de la temperatura instantánea del panel.

4.2.1.2. Inversor

Para representar el funcionamiento del inversor del sistema fotovoltaico propuesto se ha utilizado el modelo propuesto en [88],[83] y que se indica en (4.2), expresión en la cual se evalúa la eficiencia del proceso de conversión.

$$\eta_{inv} = \frac{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}} + \left[M_0 + M_1 * \frac{P_{CC}}{P_{NOM}} \right]} \quad (4.2)$$

Dónde:

η_{inv} : representa la eficiencia del inversor.

P_{CC} : es la potencia de entrada al inversor en CC.

P_{NOM} es la potencia nominal del inversor.

M_0 : coeficiente con un valor de 0.0039.

M_1 : coeficiente con un valor de 0.0023.

4.2.1.3. Regulador

El modelo escogido para modelar el comportamiento del regulador es el desarrollado en [83], en el cual este dispositivo está conformado por dos interruptores, uno colocado entre el arreglo de paneles fotovoltaicos y el otro entre la batería y la carga, que se activan o desactivan de acuerdo a los estados planteados en (4.3) y (4.4) respectivamente.

$$\text{Interruptor 1} = \left\{ \begin{array}{l} \text{conexión} \rightarrow V_{bat} \leq V_{panel} \\ \text{desconexión} \rightarrow V_{bat} \geq V_{panel} \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

$$\text{Interruptor 2} = \left\{ \begin{array}{l} \text{conexión} \rightarrow V_{bat} \geq V_{cseg} \\ \text{desconexión} \rightarrow V_{bat} \leq V_{cmin} \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

4.2.1.4. Baterías

Probablemente constituye el equipo más difícil de modelar su comportamiento debido a los procesos químicos que intervienen en el, razón por la cual para el sistema propuesto solo se busca caracterizar el proceso de carga y descarga del grupo de almacenamiento de energía, para esto se emplearon los modelos enunciados en [83],[89],[90].

Para el modo de carga se tienen las siguientes expresiones:

$$V_{carga} = (2 + 0.0148\beta) * \eta_s \quad (4.5)$$

$$R_{carga} = \frac{0.758 + \frac{0.1390}{(1.06 - \beta)}}{SOC_m} \quad (4.6)$$

$$V_{bat} = V_{carga} + i_{bat} * R_{carga} \quad (4.7)$$

Mientras que para el modo de descarga se tienen las siguientes expresiones:

$$V_{descarga} = (1.926 + 0.124\beta) * \eta_s \quad (4.8)$$

$$R_{descarga} = \frac{0.19 + \frac{0.1037}{(\beta - 0.14)}}{SOC_m} \quad (4.9)$$

$$V_{bat} = V_{descarga} + i_{bat} * R_{descarga} \quad (4.10)$$

En los dos casos se aplica:

$$\beta = \frac{SOC}{SOC_m} \quad (4.11)$$

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{C}\right) \quad (4.12)$$

Dónde:

SOC_m : corresponde la energía máxima de la batería.

η_s : es el número de celdas en serie de 2V.

R_0 : es la resistencia interna de la batería.

Q : constituye la capacidad o carga real de la batería.

i : es la intensidad de corriente de la batería.

4.2.1.5. Red de distribución

Una vez modelados todos los elementos que conforman la micro red fotovoltaica propuesta,

se puede obtener la potencia activa (P) que estos son capaces de entregar para la alimentación de la cocina eléctrica de inducción, por otro lado gracias a la curva de demanda construida es posible conocer la cantidad de potencia que esta necesita para su funcionamiento y si se considera que solo se busca recurrir a la red de distribución para satisfacer los picos de demanda, se tiene que la red de distribución puede ser modelada por (4.13).

$$P_{red} = P_{carga} - (P_{SF} + P_{bat}) \quad (4.13)$$

Dónde:

P_{red} : corresponde a la potencia aportada por la red para la alimentación de la carga.

P_{carga} : constituye la potencia solicitada por la cocina de inducción.

P_{SF} : es la potencia generada por el sistema fotovoltaico (paneles e inversor).

P_{bat} : constituye la potencia extraída desde el banco de baterías (baterías y regulador).

4.2.1.6. Modelo de operación

La micro red planteada para la alimentación de la cocina de inducción deberá cumplir con una operación específica, la cual fue previamente definida y se encuentra detallada en el Anexo I. Este modelo de operación también ha sido incluido en la modelación del sistema a fin de obtener un comportamiento lo más real posible, para ello se ha usado el bloque “Matlab Function” de la plataforma Simulink en el cual se han cargado las condiciones contempladas en el flujograma del Anexo I, es importante mencionar que debido al modelo utilizado para la simulación de las baterías se ha realizado una variación en el modelo de operación con respecto al ciclo de descarga de las mismas, el cual se realizará totalmente es decir hasta llegar al 0% de carga, lo que significa que en las simulaciones a realizarse a continuación el banco de baterías será capaz de entregar toda la energía almacenada.

Una vez detallados todos los modelos utilizados para la caracterización del funcionamiento de la micro red fotovoltaica, en la Figura 4.4 se puede apreciar el modelo completo del sistema propuesto desarrollado en la plataforma Simulink de Matlab,

utilizando la metodología de bloques o subsistemas.

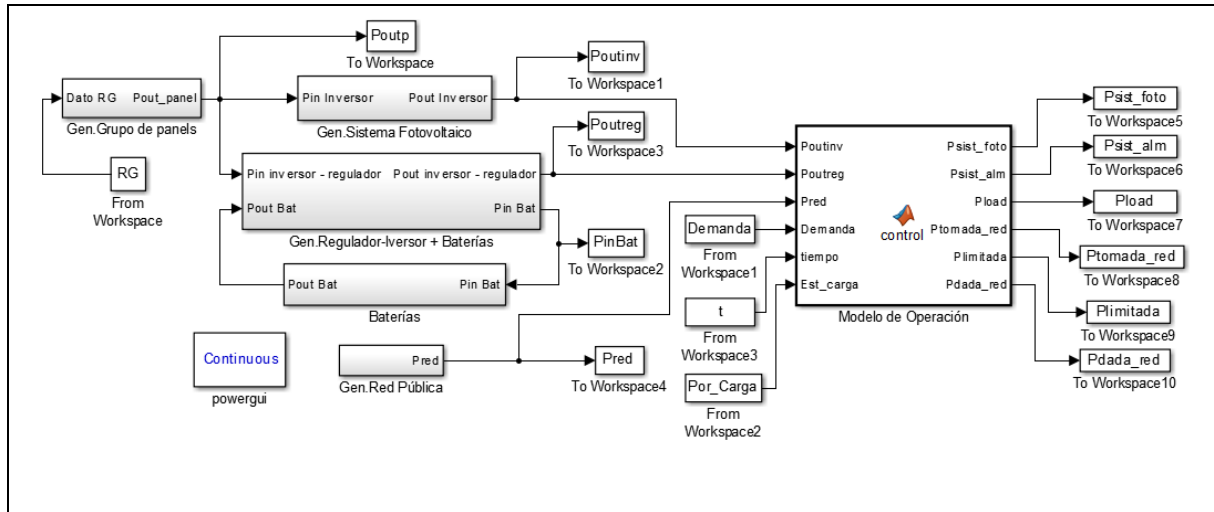


Figura 4. 4 Modelación de micro red fotovoltaica y modelo de operación propuestos.

Fuente: Autor.

4.2.2 Simulación de la operación de la operación de la micro red fotovoltaica

Con la modelización de la micro red fotovoltaica y del modelo de operación propuestos, se realizó cuatro casos de simulación, el primero de ellos se lo hizo para el mes de abril que constituye el mes con menos recurso solar según el TMY aplicado [76], el segundo caso de simulación se lo hizo considerando al mes de agosto, que es el mes con mayor recurso solar disponible, mientras que para los últimos casos de simulación se ha modificado la curva de demanda tipo, cambiando el horario pico del mediodía para que este coincida con el horario de mayor radiación solar, con este cambio se repitió las simulaciones para los meses de abril y agosto. En cada uno de los casos de simulación se analizó dos escenarios con respecto al estado de carga del banco de baterías al inicio del día.

4.2.2.1. Caso N.-1 de simulación

Esta simulación fue hecha considerando valores promedios de la radiación solar para el mes de abril según los datos mostrados en [76], también se consideró los datos de la curva de demanda construida para el funcionamiento de la cocina de inducción. Y se han considerado los siguientes escenarios:

a) Escenario 1

Para el escenario uno se definió de manera heurística que al inicio del día el banco de

baterías tenga el 100% de su capacidad de carga. Utilizando el modelo detallado en la Figura 4.4 ha sido posible obtener los siguientes resultados.

En la figura 4.5 se puede observar la gestión que realiza el modelo de operación de la micro red fotovoltaica durante un día de operación tipo de la cocina de inducción para el mes de abril, en esta imagen se puede notar claramente los horarios en los cuales el modelo de operación recurre al banco de baterías y a la red para satisfacer las necesidades de la carga y corresponden a los valores de potencia negativa.

Asimismo es posible apreciar los intervalos de tiempo en los cuales se tiene generación del sistema fotovoltaico, la cual está destinada principalmente a alimentar a la cocina así como también a cargar al banco de baterías, de igual manera también se aprecia el periodo de tiempo en el cual se ejerce la limitación de generación sobre el sistema fotovoltaico. Todos estos comportamientos corresponden a los valores de potencia positiva.

En la imagen también se incorporó la curva de demanda con la finalidad de comprobar que la gestión realizada por el modelo propuesto satisfaga a capacidad la potencia requerida por este equipo.

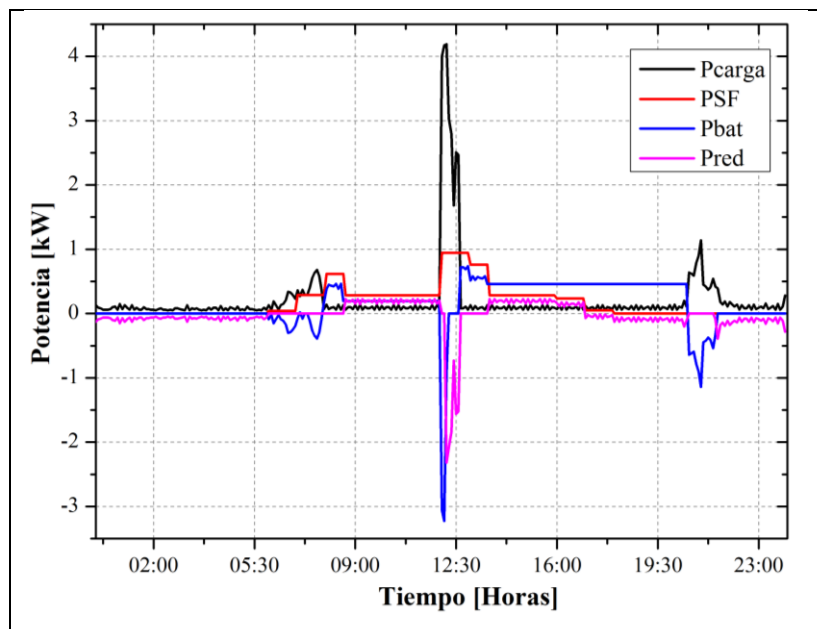


Figura 4.5 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril- Escenario 1.

Fuente: Autor.

La Figura 4.6 muestra el balance general de energía para el día típico del mes de abril, en esta imagen se muestra el aporte de energía de cada una de las fuentes que intervienen en el

sistema propuesto, de las cuales reciben prioridad aquellas energías proveniente del sistema de generación fotovoltaica y del banco de baterías, asimismo en esta figura se hace constar la energía que el sistema fotovoltaico está en condiciones de entregar a la red pública y aquella que se deja de generar, denotada como E sin generar para esta y todas las figuras, debido a que el modelo de operación ha cumplido con sus prioridades es decir abastecer el consumo propio de la cocina y cargar al sistema de almacenamiento.

De la misma manera se puede apreciar la acción del modelo de operación entre las 17:00 h y las 20:30 h, periodo en el cual se prioriza el uso de electricidad proveniente desde la red de distribución para abastecer en consumo en “stand by”, buscando de esta forma emplear la energía almacenada en las baterías en el periodo de mayor consumo de la cocina. Este comportamiento es el mismo para todos los casos de simulación que se presentan a continuación.

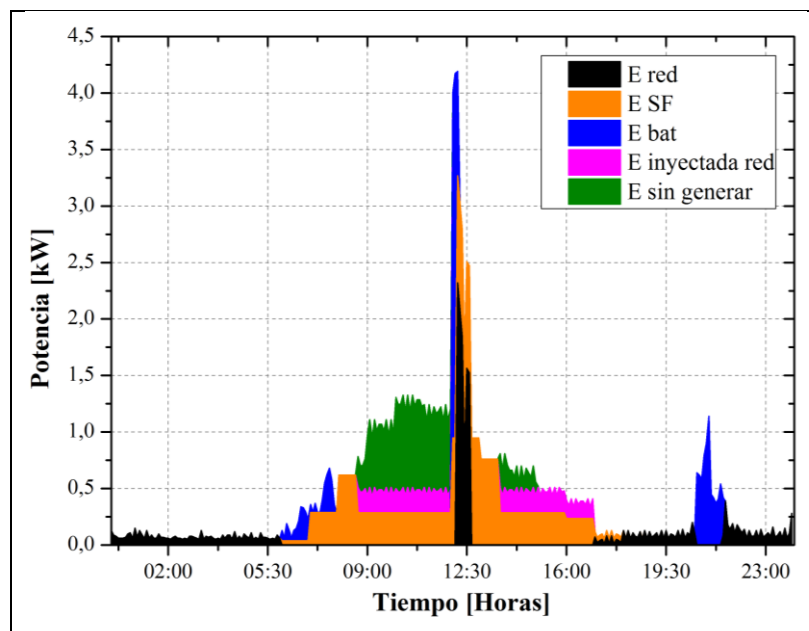


Figura 4. 6 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril-Escenario 1.

Fuente: Autor.

b) Escenario 2

En este escenario se consideró también de manera heurística que el estado del banco de baterías en el inicio del día tipo para el mes de abril sea del 0% es decir que se encuentren totalmente descargadas. Los resultados de gestión la gestión de la potencia producida y consumida así como el balance energético, obtenidos de la simulación para este escenario

se muestran en las Figuras 4.7 y 4.8 respectivamente.

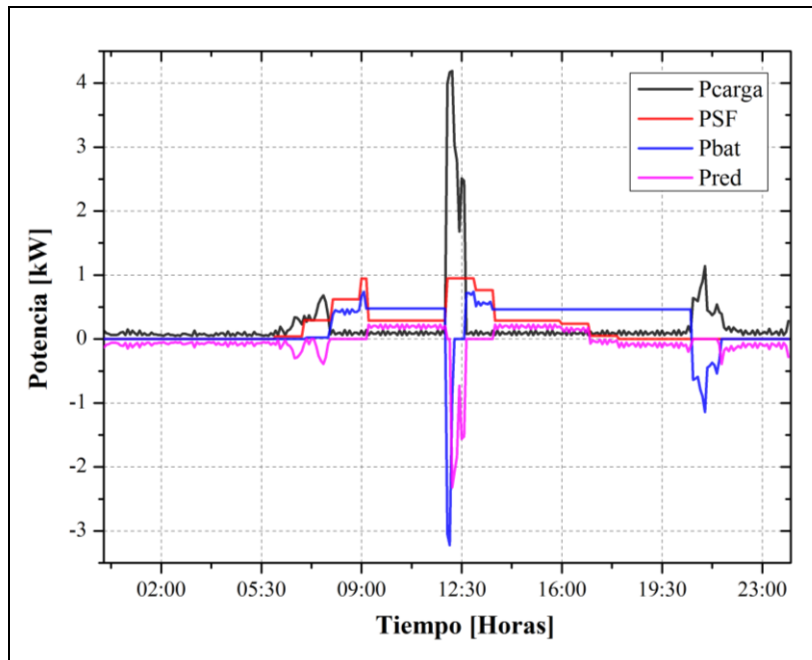


Figura 4. 7 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril-Escenario 2.
Fuente: Autor.

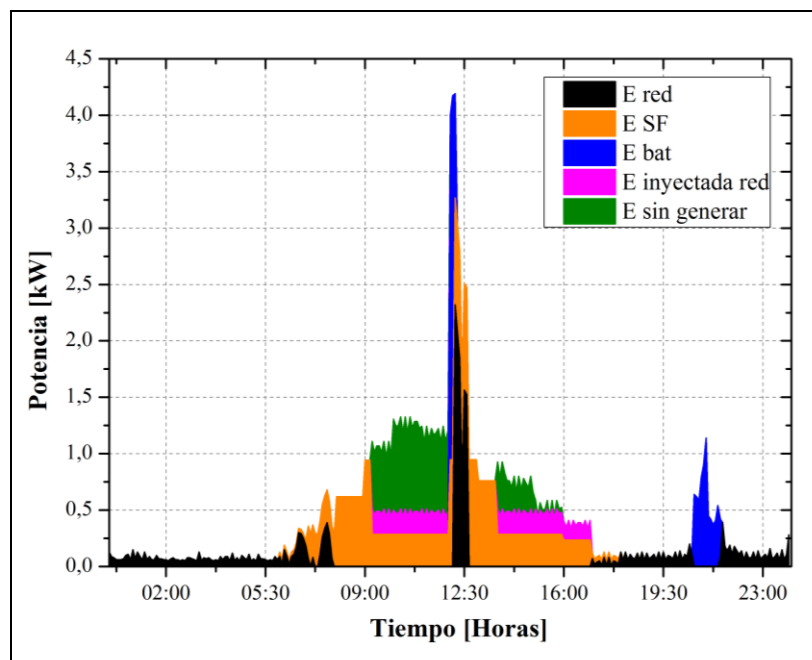


Figura 4. 8 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril-Escenario 2.
Fuente: Autor.

4.2.2.2. Caso N.-2 de simulación

Esta simulación fue hecha considerando valores promedios de la radiación solar para el mes con mayor cantidad de recurso solar, el cual es agosto, asimismo se consideró los datos de la curva de demanda construida para el funcionamiento de la cocina de inducción. Esta simulación fue hecha para los mismos escenarios que el caso N.-1 de simulación.

a) Escenario 1

Como ya se manifestó para este escenario en el estado de carga de las baterías siempre será igual al 100% al inicio del día. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran los resultados obtenidos para la simulación de este escenario.

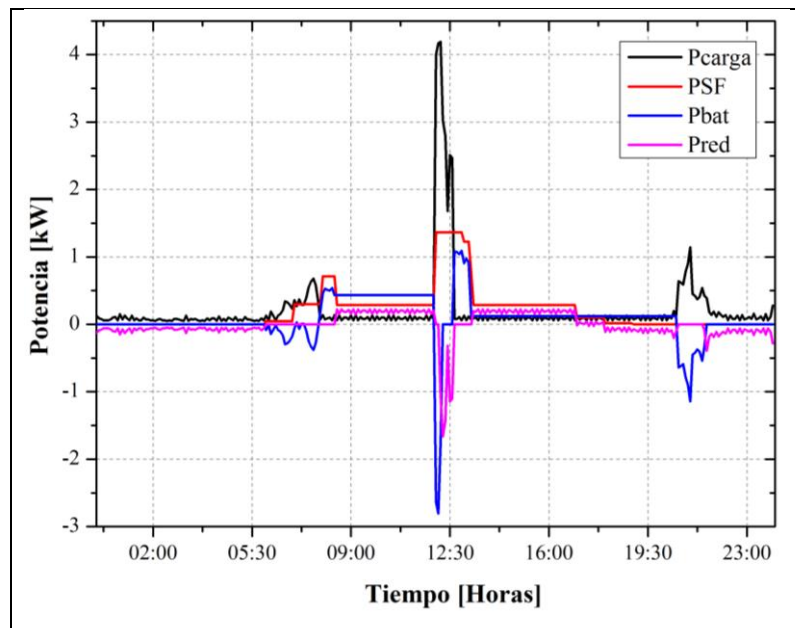


Figura 4. 9 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes agosto- Escenario 1.

Fuente: Autor

De esta imagen se puede desprender que al tener una mayor cantidad de recurso solar y la presencia del mismo desde horas más tempranas en la mañana la potencia requerida del banco de baterías es menor en relación al mes de abril.

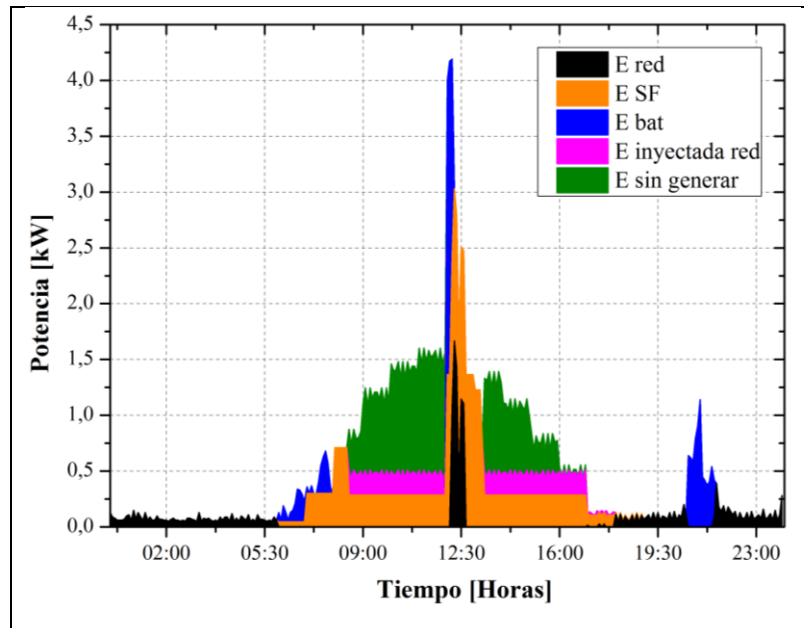


Figura 4. 10 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto-Escenario 1.
Fuente: Autor.

Para el mes de agosto y debido al modelo de operación propuesto se tiene que la energía que deja de generar el sistema fotovoltaico aumenta en relación con el mes de abril y de la misma forma se ve una disminución de la energía proveniente de la red para satisfacer el pico del mediodía.

b) Escenario 2

La condición considerada para este escenario al igual que en el caso N.-1 de simulación es que al inicio del día el estado de carga del banco de baterías se encuentre completamente descargado, es decir tengo un valor igual a 0. En las Figuras 4.11 y 4.12 se encuentran plasmados los resultados correspondientes a este escenario del mes de agosto.

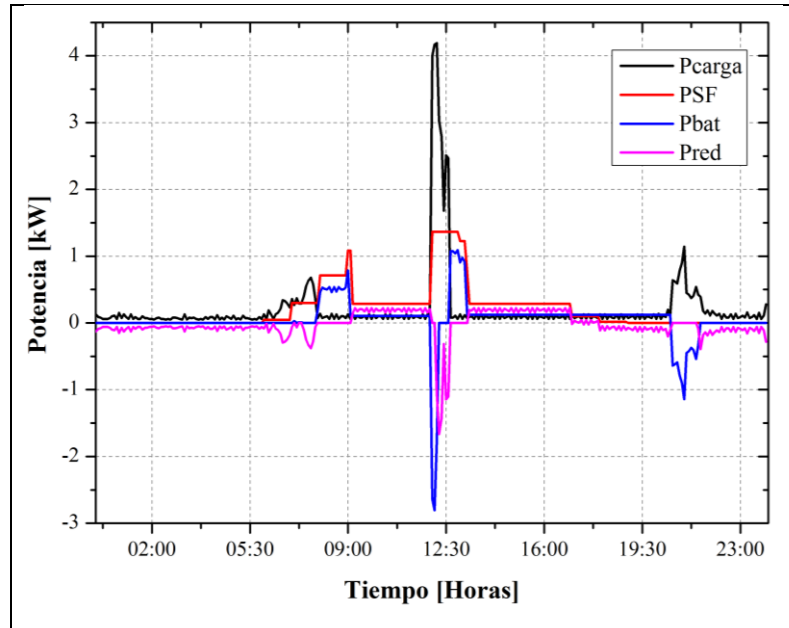


Figura 4. 11 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes agosto-Escenario2.
Fuente: Autor

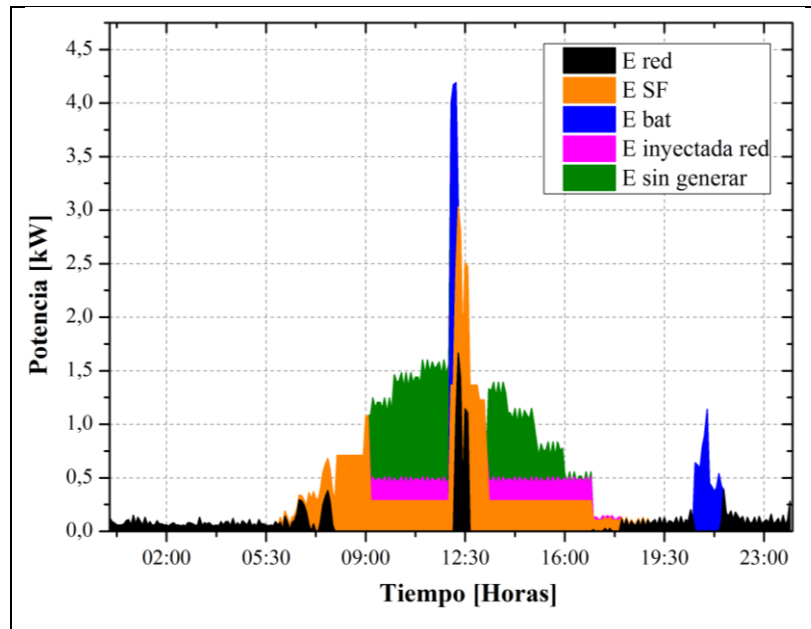


Figura 4. 12 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto-Escenario 2.
Fuente: Autor.

4.2.2.3. Caso N.-3 de simulación

Debido a que las horas con mayor recurso solar se encuentran entre las 10:00 h y 11:00 h según el TMY empleado para el desarrollo de este trabajo, se ha decidido realizar una nueva simulación para el mes de abril pero esta vez en la curva de demanda tipo construida se ha cambiado la hora de inicio del pico del mediodía a las 11:00 h.

a) Escenario 1

La Figura 4.13 y 4.14 muestran los resultados de esta simulación, considerando que el estado de carga es del 100%.

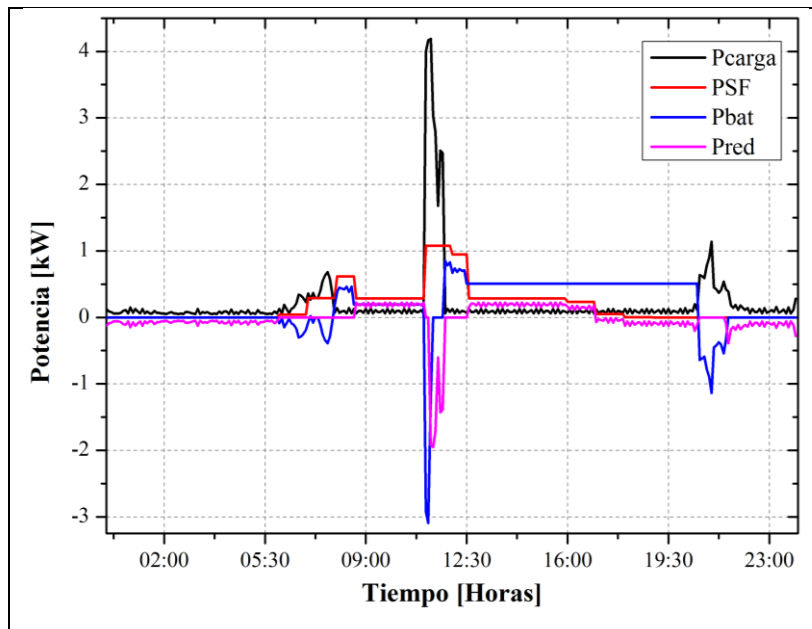


Figura 4. 13 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes abril-Escenario1.

Fuente: Autor

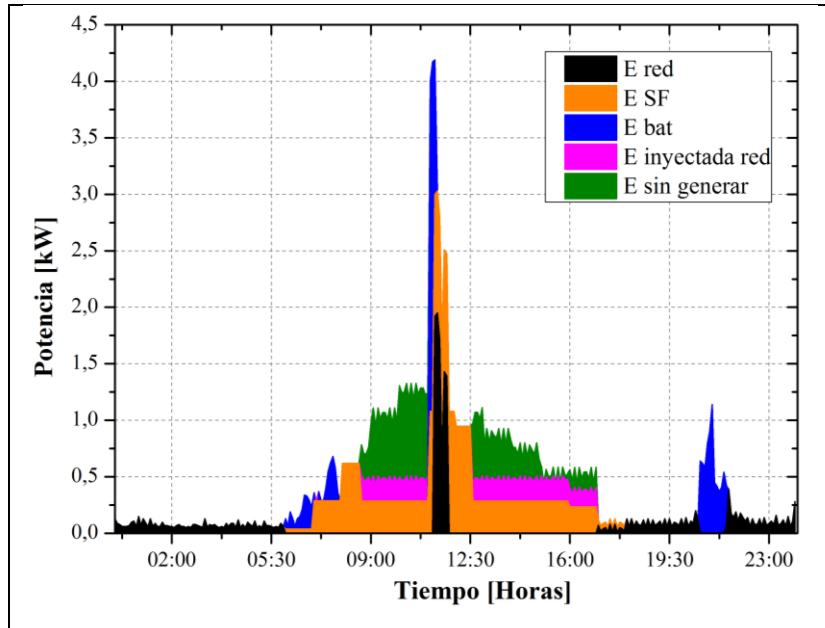


Figura 4. 14 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes abril-Escenario 1.

Fuente: Autor.

Para el caso del mes de abril se puede notar que sería conveniente realizar la preparación de los alimentos del almuerzo alrededor de las 10:00 h o 10:30 h y de esta manera obtener cubrir la demanda de este pico con energía en su mayoría proveniente de la generación fotovoltaica.

b) Escenario 2

Los resultados de esta simulación se encuentran tanto en la Figura 4.15 como en la Figura 4.16, en este escenario la carga de las baterías ha sido igual al 0%. Para este escenario se tiene que la energía generada por el sistema fotovoltaico a partir del recurso solar en horas de la mañana tiene una utilización más óptima en comparación con el escenario 1 debido a que el periodo de tiempo de la energía sin generar es menor.

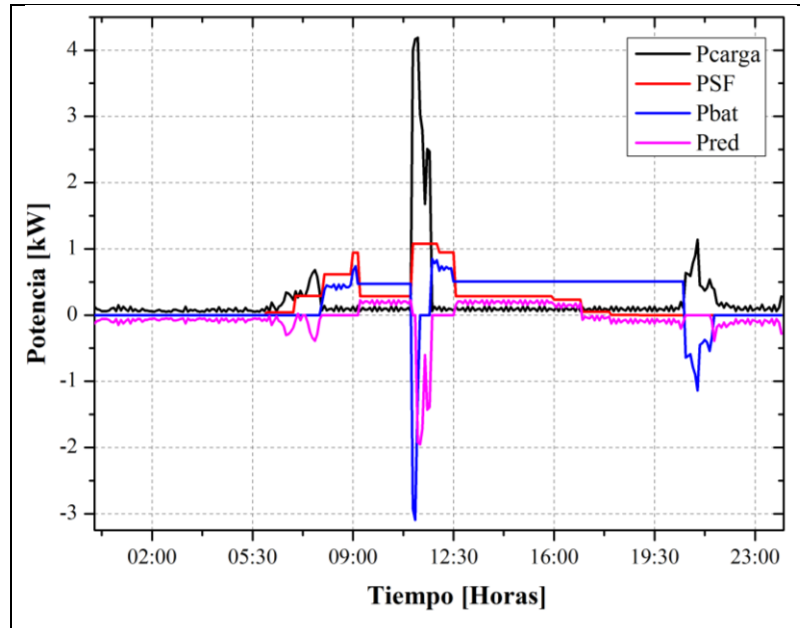


Figura 4. 15 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes abril-Escenario 2.

Fuente: Autor

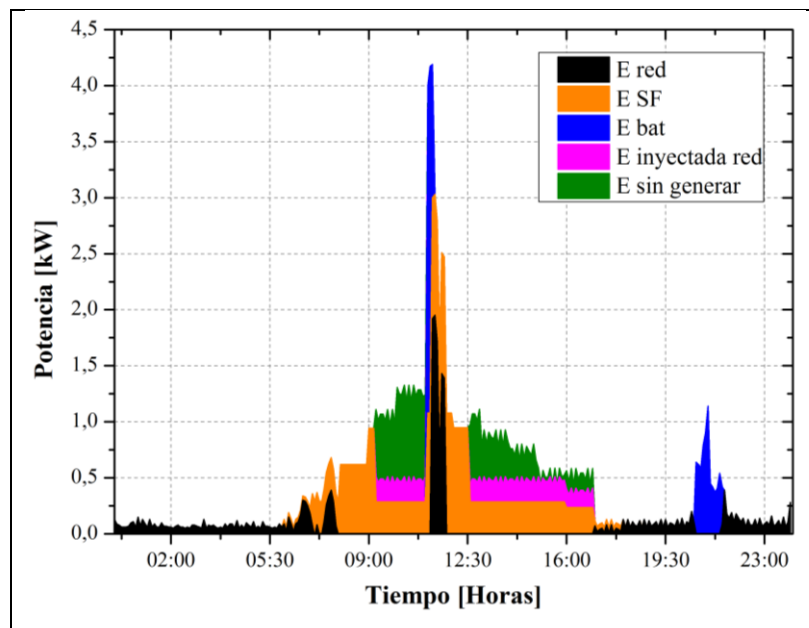


Figura 4. 16 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes abril-Escenario 1.

Fuente: Autor.

4.2.2.4. Caso N.- 4 de simulación

En este caso se repitió la simulación realizada en el caso N.-2 para el mes de agosto, pero considerando el cambio de horario en el inicio del pico del mediodía a las 11:00 h. Considerando los mismos escenarios que en los casos anteriores.

a) *Escenario 1*

Los resultados de este escenario, que contempla un estado de carga completa de las baterías se indican en las Figuras 4.17 y 4.18.

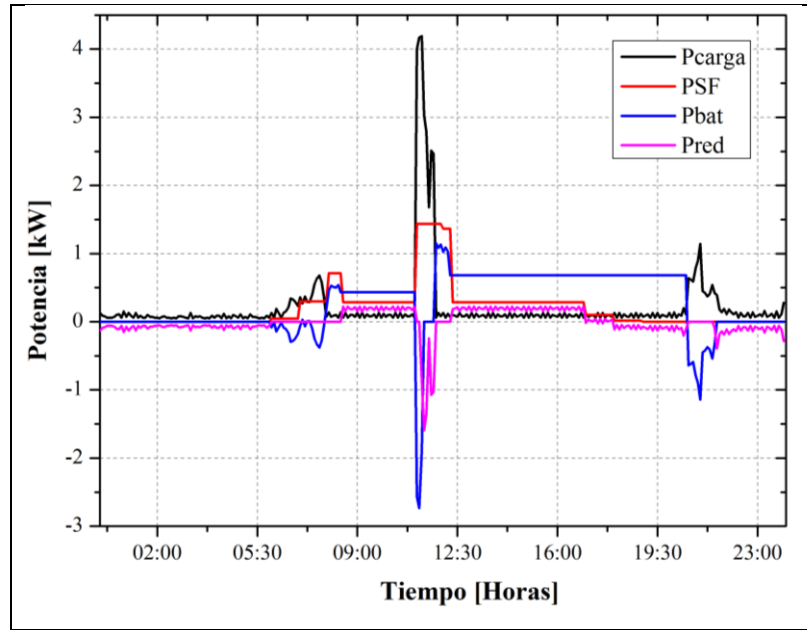


Figura 4. 17 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes agosto-Escenario1.

Fuente: Autor

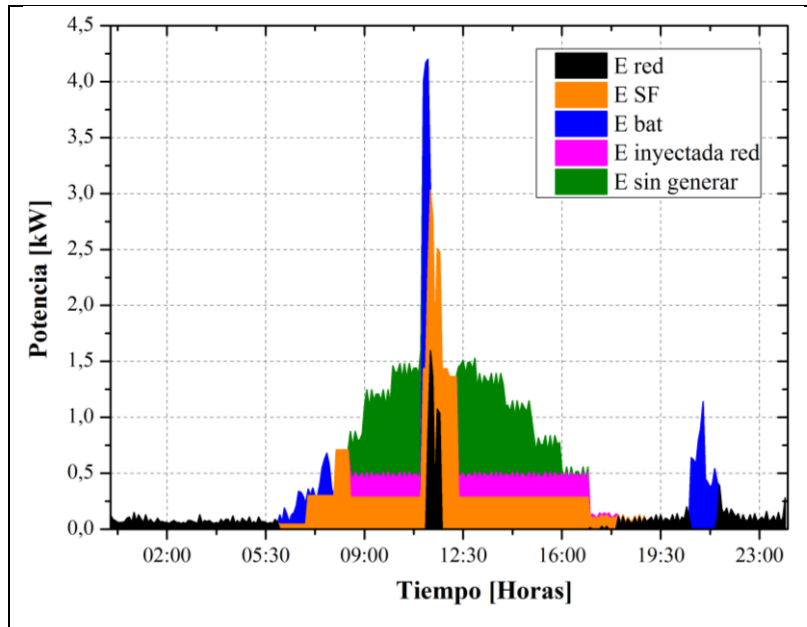


Figura 4. 18 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 1.

Fuente: Autor.

En esta simulacion se puede observar que se ha logrado aumentar la cobertura del pico del medio dia con energia proveniente del sistema fotovoltaico, lo cual a la larga a hecho que la energia proviniente de la red disminuya en este pico.

b) Escenario 2

Con un sistema de baterías completamente descargado se han obtenido los resultados de las Figuras 4.19 y 4.20.

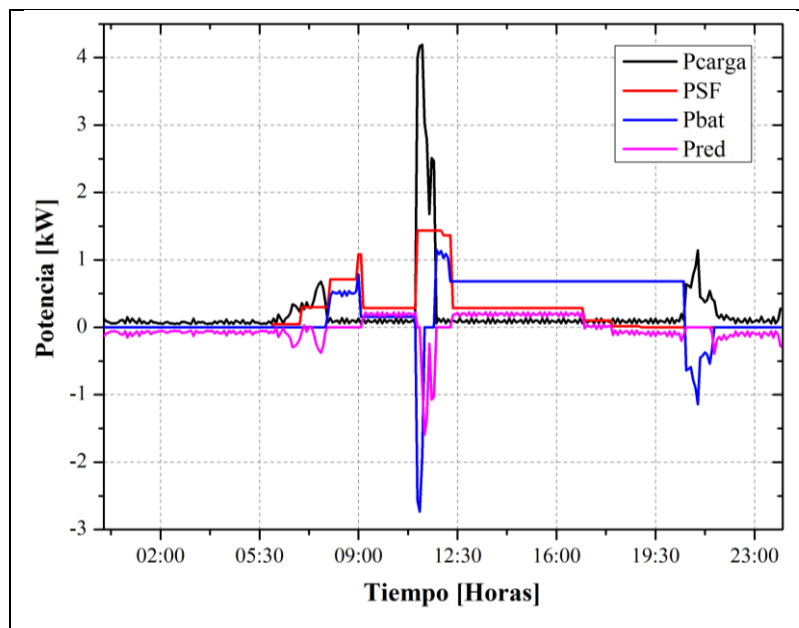


Figura 4. 19 Gestión de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 2.

Fuente: Autor

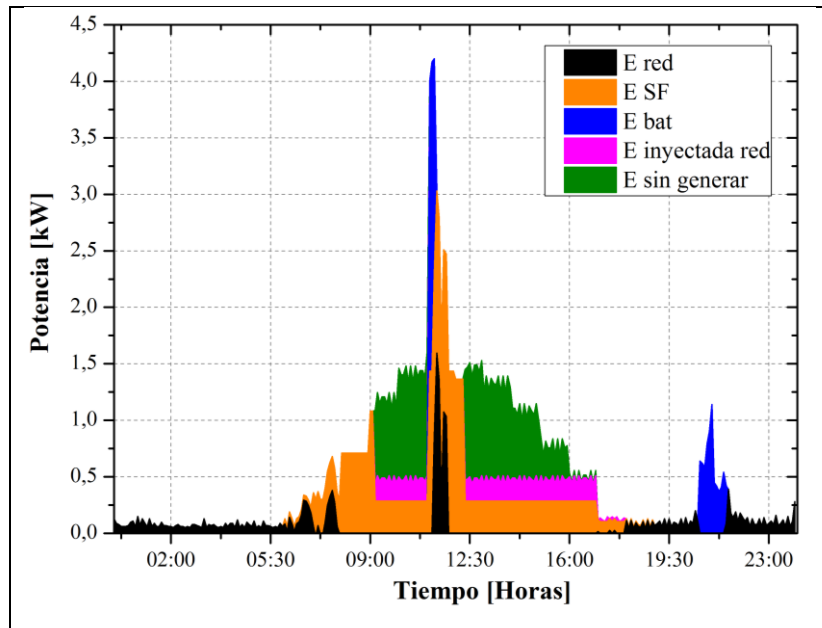


Figura 4. 20 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo desplazado. Mes agosto-Escenario 2.

Fuente: Autor.

4.2.2.5. *Caso N.- 5 de simulación*

Para este caso de simulación, se decidió eliminar el modelo de operación propuesto con la finalidad de mostrar la operación del sistema fotovoltaico sin estar sometido a prioridades de funcionamiento. Bajo estas condiciones se consideraron dos escenarios a ser simulados, los mismos que se detallan a continuación.

a) Escenario 1

Este escenario fue simulado para el mes de abril, se consideró de manera heurística que el estado de carga del banco de baterías al inicio del día es igual a cero.

La Figura 4.21 indica el comportamiento de la potencia del sistema fotovoltaico, de la red de distribución y del banco de baterías sin realizar ninguna gestión sobre ellas. Así como también se puede observar la curva de potencia de la carga a ser alimentada.

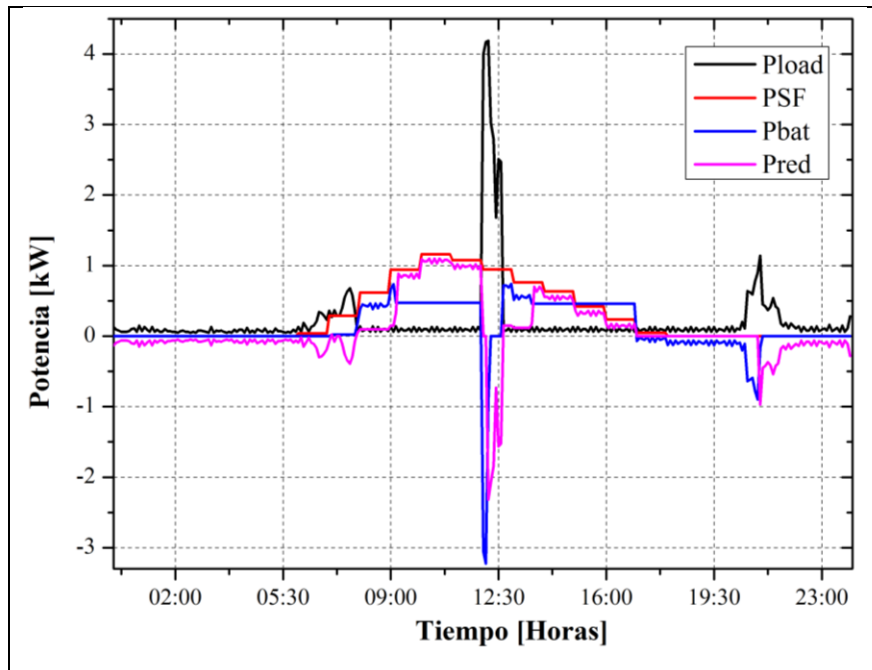


Figura 4. 21 Comportamiento de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes abril.
Fuente: Autor

Mientras que la Figura 4.22, indica el balance energético obtenido para esta simulación, como se puede observar al no contar con prioridades de funcionamiento, no se logra cubrir la mayor parte del pico de demanda de la noche con la energía almacenada en las baterías, como si ocurría en las simulaciones previas, asimismo se puede decir que cerca del 58% de la energía producida por el sistema fotovoltaico es entregado a la red pública, lo cual podría significar un beneficio económico para el abonado siempre y cuando se tuviera un mercado eléctrico en el país que fomente la entrega de energía desde el sector residencial y además existiese la infraestructura necesaria para realizar este tipo de transacciones.

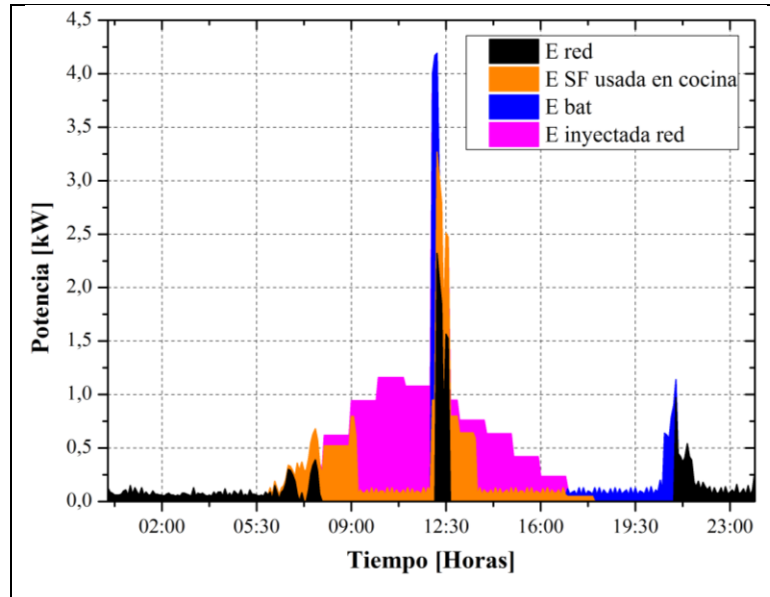


Figura 4. 22 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes abril.

Fuente: Autor.

b) Escenario 2

Se ha realizado una simulación para el mes de agosto, considerando heurísticamente al igual que para el escenario anterior, que el banco de baterías se encuentra completamente descargado al inicio del día. Las Figuras 4.23 y 4.24, muestran los resultados obtenidos para este escenario.

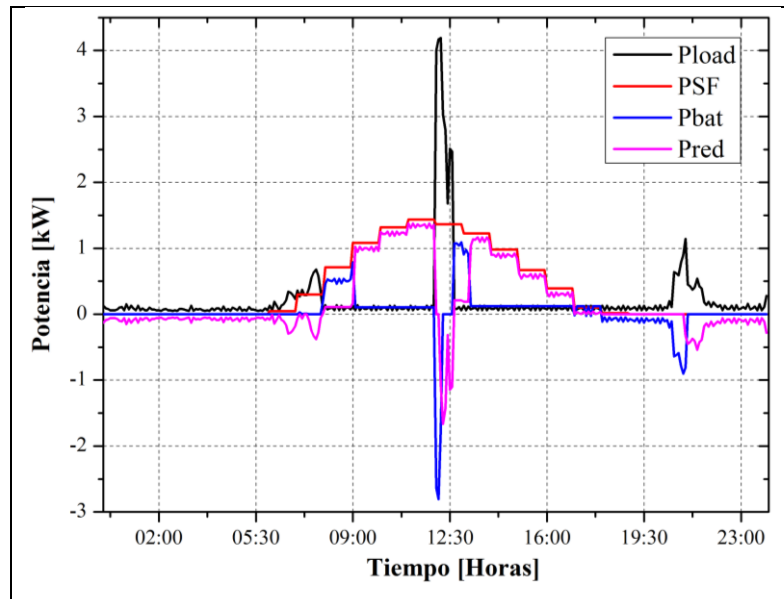


Figura 4. 23 Comportamiento de la potencia producida por el sistema propuesto Vs. Consumo. Mes agosto

Fuente: Autor

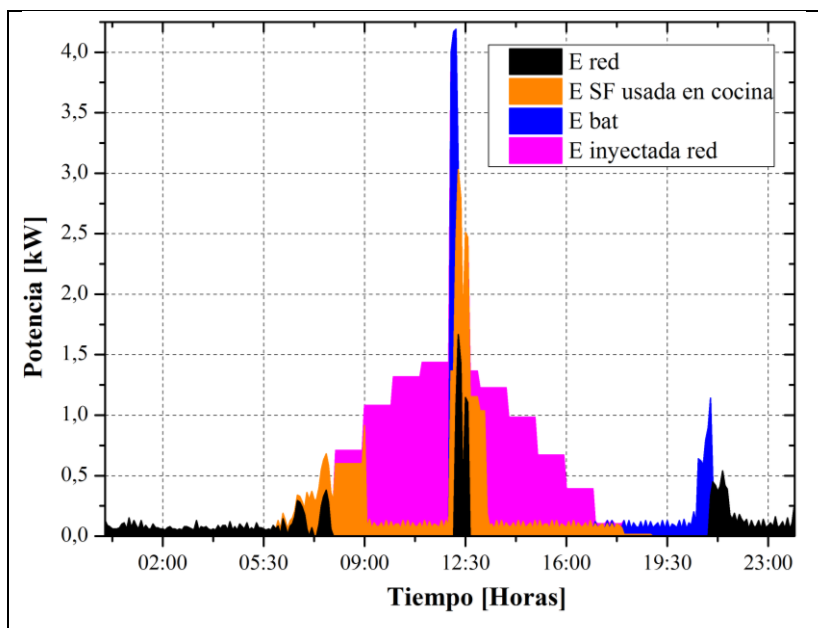


Figura 4. 24 Intercambio energético entre el sistema propuesto y la red pública durante el consumo. Mes agosto.

Fuente: Autor.

En la Figura 4.24 es posible observar, que al ser agosto el mes con mayor recurso solar según los datos del TMY consultado, la energía entregada a la red constituye el 65% de la generación del sistema fotovoltaico.

4.2.3 Curvas de demanda con desplazamiento de picos carga

Después de conocer los resultados de los cuatro casos de simulaciones, es posible construir las curvas de demanda que se verán reflejadas sobre la red de distribución para de esta manera poder conocer los horarios y magnitudes de los nuevos picos de carga.

Con este fin se decidió realizar unas graficas comparativas en las que se muestra la curva de demanda tipo para la cocina de inducción construida en base a las mediciones hechas y la curva de demanda después de alimentar a esta cocina con energía proveniente de la micro red fotovoltaica para cada uno de los casos de simulación.

4.2.3.1. Desplazamiento de picos de carga para el caso N.-1 de simulación

En la Figura 4.25 se puede observar en la parte superior con color rojo la curva de demanda resultante después emplear la micro red fotovoltaica y con las condiciones

planteadas en el escenario 1, mientras que en la parte inferior igual en color rojo se ilustra la curva de demanda pero según las condiciones fijadas en el escenario dos de las simulaciones hechas.

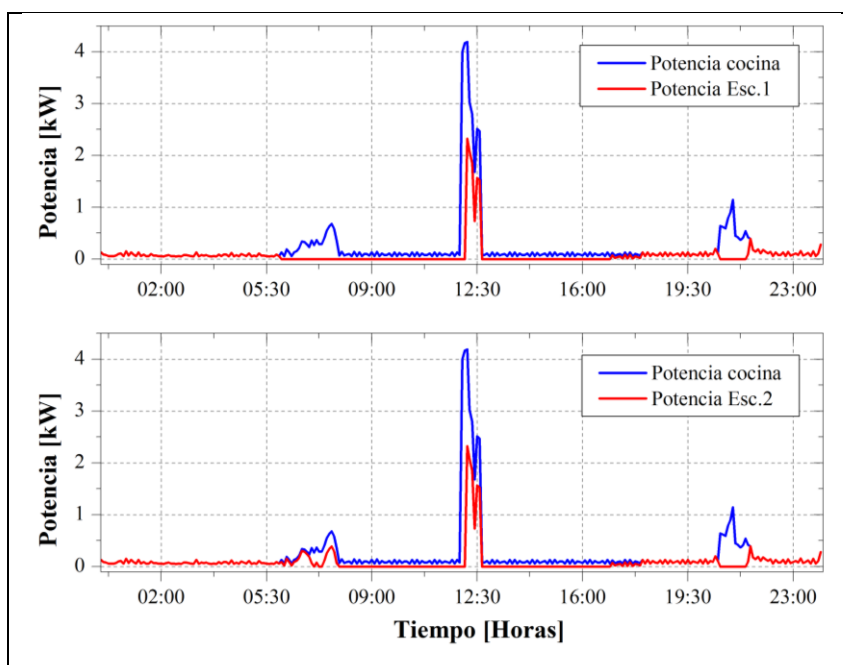


Figura 4. 25 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-1 de simulación. Mes abril.
Fuente: Autor.

Es importante mencionar que la configuración de las gráficas es la misma para todas las figuras de los siguientes apartados.

4.2.3.2.Desplazamiento de picos de carga para el caso N.-2 de simulación

La Figura 4.26 muestra las nuevas curvas de demanda para el mes de agosto según los dos escenarios planteados para la simulación.

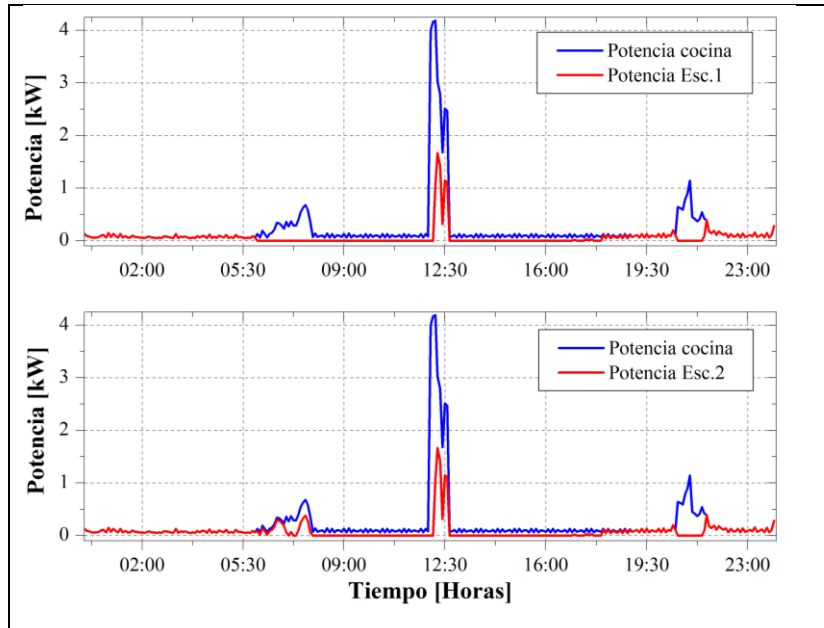


Figura 4. 26 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-2 de simulación. Mes agosto.
Fuente: Autor.

4.2.3.3. Desplazamiento de picos de carga para el caso N.-3 de simulación

La Figura 4.27 muestra las nuevas curvas de demanda para el mes de abril con la variación hecha en la curva de demanda y para los dos escenarios planteados en la simulación.

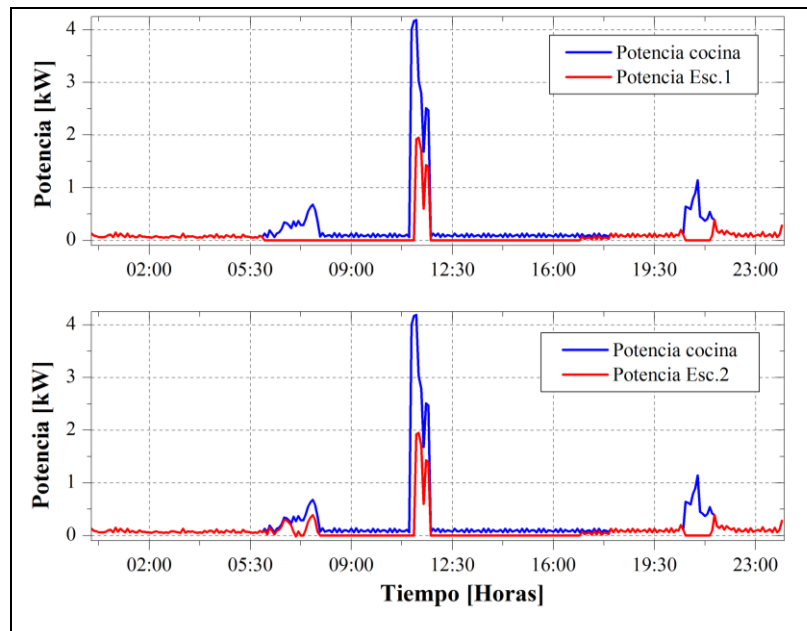


Figura 4. 27 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-3 de simulación. Mes abril.
Fuente: Autor.

4.2.3.4. Desplazamiento de picos de carga para el caso N.-4 de simulación

La Figura 4.28 ilustra las nuevas curvas de demanda para el mes de agosto con la variación hecha en la curva de demanda y para los dos escenarios planteados en la simulación.

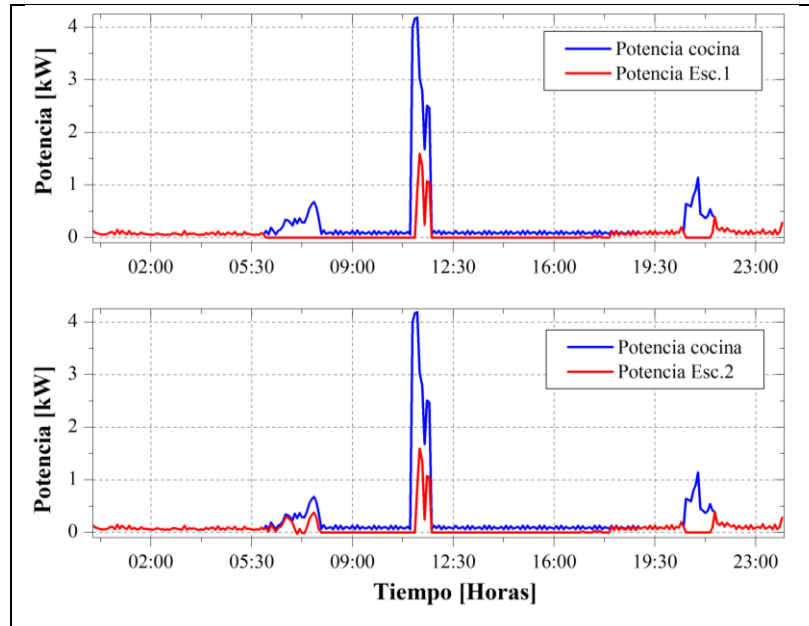


Figura 4. 28 Desplazamiento picos de demanda para el caso N.-4 de simulación. Mes agosto.

Fuente: Autor.

Como se puede observar en los resultados mostrados en esta sección, la micro red fotovoltaica ayuda a en todos los casos a eliminar los picos nocturnos ocasionados por la cocina de inducción además de atenuar en términos generales entre el 45% y 50% del pico producido en el mediodía. Mientras que el pico de la mañana es el más dependiente del estado de carga de las baterías y de la cantidad de recurso solar, por lo cual se puede decir que este pico puede ser atenuado en entre un 20% o un 25%, para condiciones de descarga total del banco de baterías.

4.3 Liberación de potencia en la red de distribución por uso de micro red fotovoltaica

Los datos conseguidos en las simulaciones realizadas, han permitido evaluar el porcentaje de disminución de dependencia de la red de distribución debido a la implementación de la micro red fotovoltaica para la alimentación de cargas concurrentes con potencias nominales elevadas como lo es la cocina eléctrica de inducción.

En el caso del día típico para el mes de abril con las consideraciones hechas en los escenarios 1 y 2 en el caso N.-1 de simulación, se consiguió que la potencia proveniente de la red de distribución este entre el 36.9% y el 42.4% del consumo total del electrodoméstico. Estos datos se encuentran graficados en la parte izquierda de la Figura 4.29.

Con la variación en la curva de demanda planteada en el caso N.- 3 de simulación, se disminuyó el aporte proveniente de la red entre el 35.17% y el 40.6% respectivamente para cada escenario. Esto se aprecia en la parte derecha de la Figura 4.29.

En términos generales se puede decir que la liberación de la red de distribución gracias al uso de la micro red fotovoltaica está en el orden del 57% al 65%.

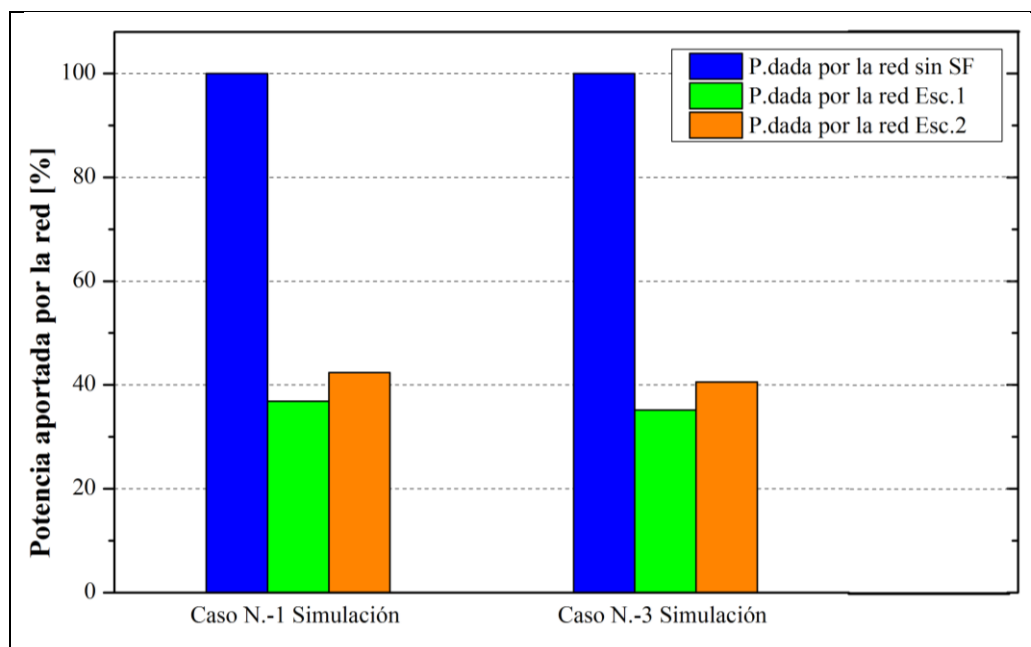


Figura 4. 29 Porcentaje de potencia aportada por la red para la alimentación de la cocina de inducción. Simulaciones mes abril.

Fuente: Autor.

Mientras que considerando el día típico del mes de agosto, para los escenarios del caso N.-3 de simulación, se logró determinar que la potencia proveniente de la red de distribución publica es del 30.48% en el escenario 1, es decir con las baterías completamente cargadas al inicio del día y del 35.69% para el escenario 2 con las baterías descargadas en el inicio de la simulación. Estos valores se indican en la parte izquierda de la Figura 4.30.

Para el mismo día típico del mes de agosto y con los cambios en la demanda hechos en el caso N.- 4 de simulación, se determinó que para el escenario 1 el aporte de la red pública es el 29.56% , mientras que para el escenario 2 la potencia aportada se incrementa al 34.7%. Estos valores se encuentran detallados en la parte derecha de la Figura 4.30.

De manera general se puede decir que para el mes de agosto la liberación de potencia de la red de distribución está en el rango del 64% al 70%.

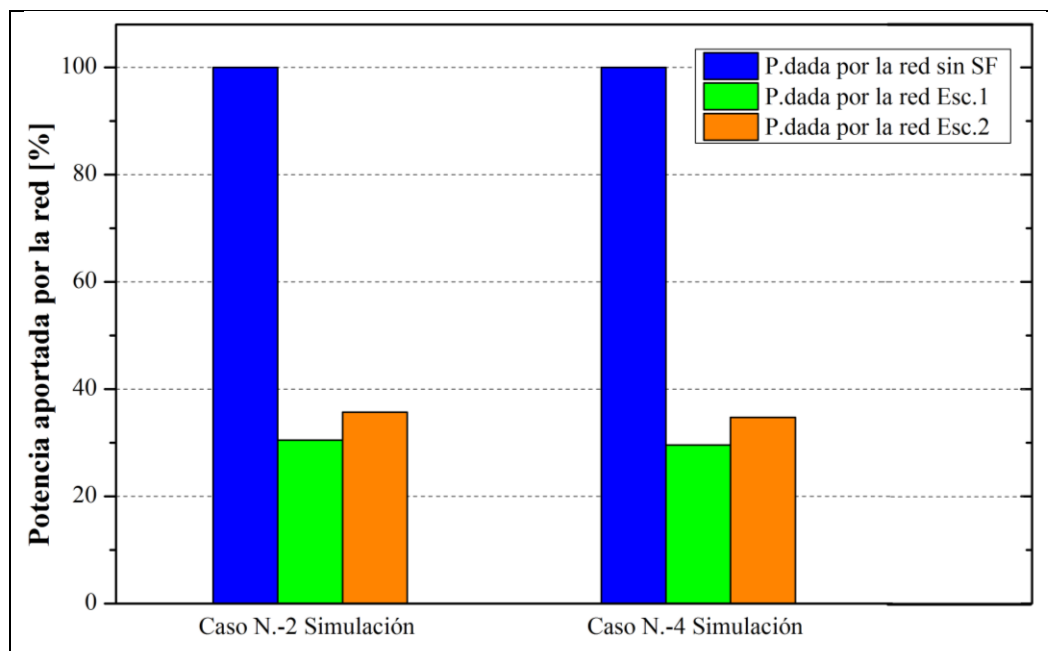


Figura 4. 30 Porcentaje de potencia aportada por la red para la alimentación de la cocina de inducción. Simulaciones mes agosto.

Fuente: Autor.

Reducir la potencia aportada por la red de distribución, tendrá una repercusión directa en la eficiencia de la misma debido a que se reducirán las pérdidas en conductores por ocasionadas por el efecto Joule, se contribuirá a eliminar las sobrecargas en transformadores de distribución que constituyen los elementos de mayor importancia del sistema, también permitirá realizar una mejor gestión de la energía en los horarios picos, lo cual ayudará a garantizar el suministro de electricidad.

4.4 Factibilidad de implementación de la micro red fotovoltaica propuesta

Después de verificar la idoneidad técnica de la micro red fotovoltaica propuesta en este trabajo es importante realizar una evaluación económica de la implementación del mismo,

mediante este análisis se podrá determinar la factibilidad o no de usar este sistema como alternativa para el reemplazo de GLP en equipos de cocción. Para el desarrollo del estudio económico se ha considerado los siguientes aspectos:

4.4.1 Inversión inicial de la micro red fotovoltaica y vida útil de los equipos

La Tabla 4.3 muestra un presupuesto referencial para el sistema fotovoltaico propuesto en este trabajo, el cual fue hecho en base a precios consultados en dos empresas dedicadas a la importación, comercialización e instalación de equipos para generación de electricidad con energías renovables y cuya residencia fiscal está en la ciudad de Quito D.M. Asimismo en dicha tabla se ha incluido el periodo de vida útil de cada uno de los equipos, este dato se lo usó para determinar el tiempo de evaluación del análisis económico.

TABLA 4. 3 *Presupuesto referencial para micro red fotovoltaica propuesta*

Cantidad	Descripción Ítem	Valor unitario	Valor Total	Vida útil
1	Inversor SMA SUNNY BOY	\$ 2.219,81	\$ 2.219,81	12 años
1	Inversor SUNNY ISLAND	\$ 4.999,72	\$ 4.999,72	12 años
10	Panel solar SIMAX 190 Wp	\$ 350,00	\$ 3.500,00	20 años
4	Baterías de gel	\$ 391,23	\$ 1.564,92	15 años
10	Estructura para paneles	\$ 59,79	\$ 597,90	20 años
1	Instalación	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	
Subtotal			\$ 14.082,35	
IVA 12%			\$ 1.689,88	
Valor Total (USD)			\$ 15.772,23	

Fuente: Autor

4.4.2 Ahorros generados por la micro red fotovoltaica

Bajo este concepto dentro del análisis económico se han considerado tres aspectos:

Producción del sistema fotovoltaico: constituye la energía anual producida por la micro red fotovoltaica y usada para alimentar a la cocina eléctrica de inducción así como también aquella que fue entregada como excedente de producción una vez aplicada la limitación contemplada en el modelo de operación propuesto en este trabajo.

El precio del kWh contemplado para la energía producida por la micro red fotovoltaica es igual que el costo cancelado por el kWh en el sector residencial, es decir 0.0933 USD por cada kWh según [91],[92].

Reducción de emisiones: al generar electricidad a partir de la radiación solar, la micro red fotovoltaica ayuda a que centrales de generación cuyo combustible principal sea de origen fósil operen por menos tiempo lo cual significa mitigar los efectos del cambio climático.

Para la evaluar la reducción de emisiones contaminantes se utilizó el factor de emisión de la generación eléctrica de Ecuador para proyectos eólicos y solares del año 2013, el cual es igual a 0.6071 ton CO₂/MWh y aparece en [93].

Consumo de GLP: al migrar del uso del gas licuado de petróleo (GLP) a la electricidad para la cocción de alimentos, es importante incluir este valor como el principal rubro de ahorro, aún más si se considera que el valor de este hidrocarburo perderá su subsidio en los siguientes años. Para llevar a cabo el análisis económico se consideró un precio promedio entre los valores de venta al público del cilindro de 15 kg de GLP en países vecinos como Colombia y Perú, donde el precio del hidrocarburo es 23.25 y 17.00 USD respectivamente [94],[95].

Dentro de la evaluación económica, los aspectos antes detallados serán considerados como los ahorros obtenidos gracias al sistema fotovoltaico.

4.4.3 Operación y mantenimiento de la micro red fotovoltaica

Al igual que en las centrales de generación convencionales, es importante destinar un rubro para el mantenimiento y operación de la micro red fotovoltaica propuesta, según información recopilada en [96],[97]; el capital destinado para este fin oscila entre el 0.5% y el 1.5% de la inversión inicial hecha en el sistema fotovoltaico.

En términos generales se podría decir que las actividades relacionadas con el mantenimiento y operación de la instalación fotovoltaica se resumirían a realizar una supervisión periódica de los paneles fotovoltaicos, las estructuras, cajas de conexión y sistemas de inversión [98]. Dependiendo del lugar de implantación se deberá planificar los cronogramas de limpieza de los equipos, dado que el sistema propuesto está diseñado a implementarse en una residencia es necesario comprobar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra para de esta manera garantizar la seguridad de las personas y del sistema [98]. El rubro de operación y mantenimiento dentro del análisis económico será considerado como el principal egreso generado por el uso de la micro red fotovoltaica.

4.4.4 Costo promedio del capital ponderado (WACC)

Constituye una tasa de descuento que evalúa los costos del capital medio ponderado tanto de los recursos propios como ajenos, es empleado para encontrar la tasa mínima de retorno admisible que debería brindar un proyecto de inversión[99].La expresión (4.14) puede ser empleada para determinar esta tasa.

$$WACC = \frac{D}{D + E} * kd(1 - t) + \frac{E}{D + E} * ke \quad (4.14)$$

Dónde:

D: es el valor de mercado de la deuda.

E: es el valor de mercado del capital.

kd: es el costo de la deuda.

ke: representa el costo del capital.

t: es la tasa de impuesto a la renta.

Para el cálculo del costo del capital (*ke*) en este trabajo se aplicó el modelo de valoración de activos (CAPM) [100], el cual determina la tasa de retorno requerida basada en un incentivo de mercado, la misma que debe ser suficiente para cubrir el riesgo no diversificable [101].La expresión (4.15) permite calcular el valor del CAPM, para proyectos realizados en Ecuador debido a que se ha considerado la tasa de riesgo país.

$$CAPM = ke = \pi + rf + \beta * (RP - rf) \quad (4.15)$$

Dónde:

ke: es el costo del capital.

π : representa la tasa de riesgo país.

rf: corresponde la tasa libre de riesgo.

β : es el coeficiente beta(índice que mide la sensibilidad del proyecto frente al retorno del proyecto).

RP: es igual a la rentabilidad del mercado.

En la Tabla 4.4 muestra el resumen de los valores empleados para el cálculo del costo del capital (k_e), obtenidos de [102],[103] para la implementación de la micro red fotovoltaica.

TABLA 4. 4 Datos para el cálculo del costo del capital

Descripción	Terminología	Valor
Tasa libre de riesgo	r_f	1.75%
Riego país Ecuador	π	5.69%
Rentabilidad del mercado	RP	6 %
Coef. beta de la industria	β	0.64
Costo del capital k_e		10.14%

Fuente: Yahoo, “Market Data,” 2015. [Online]. Available: <http://finance.yahoo.com/>. [Accessed: 19-Jan-2015]; Bancon Central del Ecuador, “Banco Central del Ecuador,” 2015. [Online]. Available: <http://www.bce.fin.ec/>. [Accessed: 18-Jan-2015].

Conocido el costo del capital, se debe resolver el WACC, el cual nos permitirá saber la tasa apropiada para descontar los flujos de la caja del proyecto. En este caso en particular al considerar que la instalación fotovoltaica no va a ser financiada con deuda sino con capital propio, se tiene que el valor de k_e será igual al WACC.

4.4.5 Valor Actual Neto (VAN)

Será el primer indicador empleado para verificar la viabilidad o no de la implantación del sistema fotovoltaico, el valor actual neto (VAN) constituye la cantidad de utilidad que se podrá obtener después de recuperar el monto de la inversión inicial en un periodo de tiempo determinado. El valor actual neto (VAN) se fundamenta en que el valor del dinero decrece con el paso del tiempo[104].

Se puede decir que la inversión hecha en un proyecto ha sido recuperada y produce rentabilidad cuando al calcular el valor actual neto (VAN) se obtenga un resultado positivo. La expresión matemática para el cálculo del VAN se indica en (4.16).

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Fn}{(1+r)^n} \quad (4.16)$$

Dónde:

I : representa la inversión inicial del proyecto.

F_n : constituye el flujo de caja del año n .

r : es la tasa de interés.

N : es el número de años de la inversión.

4.4.6 Tasa interna de retorno (TIR)

Es el segundo índice a analizar para evaluar la factibilidad del sistema, la tasa interna de retorno (TIR) es el valor en el cual el valor actual neto (VAN) es igual a cero, esto quiere decir que la sumatoria de los flujos tiende a equiparar al valor de la inversión inicial [105]. Puede decirse que si el valor de la tasa interna de retorno (TIR) es mayor al WACC, el proyecto de inversión debería aceptarse caso contrario debería no realizarse la inversión en dicho proyecto. Esta tasa puede ser calculada utilizando la expresión (4.17).

$$VAN = 0 = -I + \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{(1+r)^n} \quad (4.17)$$

4.4.7 Índice de beneficio/costo

Constituye el último índice para el análisis de factibilidad económica del sistema, tiene como objetivo fundamental proporcionar una medida de la rentabilidad de un proyecto, mediante la comparación de los costos previstos con los ingresos esperados en la realización del mismo.

El criterio para tomar una decisión respecto al proyecto conociendo el índice de beneficio/costo es la siguiente:

- Si el índice beneficio/costo es mayor o igual a 1, el proyecto debe ser considerado como económicamente viable.
- Si el índice beneficio/costo es menor a 1, el proyecto no es económicamente aceptable.

Para el caso puntual del sistema fotovoltaico propuesto se consideran los ahorros generados en electricidad, consumo de GLP y reducción de emisiones nocivas al ambiente versus los costos de operación y mantenimiento. El cálculo de este índice puede hacerse empleando la expresión (4.18)

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum VAN (Ahorros)}{\sum VAN (Costos)} \quad (4.18)$$

4.4.8 Supuestos de la proyección económica

Después de detallar los aspectos considerados en el análisis económico es importante describir las condiciones en las cuales se desarrolló el mismo. El tiempo de evaluación del proyecto es de 12 años, el cual ha sido electo en base a la vida útil de los equipos. Además se ha considerado que se dispone del capital necesario para ejecutar el proyecto sin la necesidad de solicitar un crédito bancario.

Se ha estimado que la energía producida por el sistema fotovoltaico será la misma durante todo este periodo de tiempo y tendrá un costo de 0.0933 USD por kWh, con respecto a la reducción de emisiones de CO₂ se utilizó un precio de 8.18 USD por cada tonelada según [106], mientras que para el concepto de ahorro en GLP se empleó un precio de venta al público promedio de 20.12 USD.

Por concepto de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico se decidió emplear un monto igual al 0.5% de la inversión inicial [96], [97], esto principalmente debido al pequeño tamaño y potencia del sistema propuesto.

El desarrollo del análisis de factibilidad económica al igual que los resultados obtenidos en este estudio para las condiciones detalladas, se muestran en la Tabla 4.5.

Para las condiciones contempladas en la proyección económica se tiene que el proyecto de sustituir GLP por electricidad generada a partir de una micro red fotovoltaica no es económicamente viable, debido a que los valores del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) son negativos y el índice de beneficio/costo es mucho menor a 1.

Con la finalidad de poder determinar el precio por kWh generado por el sistema fotovoltaico que permita recuperar la inversión hecha en el plazo de 12 años, se realizó una corrida financiera en la cual se igualó el VAN a cero y se conservó el WACC en 10.14%, dando como resultado que este precio debería ser de 0.836 USD por cada kWh producido. Costo que considerando las políticas energéticas que se vienen aplicando en el país hacen que se prefiera utilizar otras energías primarias para la generación de electricidad destinada a los consumos del sector residencial.

TABLA 4. 5 Flujo económico para la evaluación de la implementación de la micro red fotovoltaica

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
AHORRO EN ENERGÍA													
Producción fotovoltaica [kWh]		2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529	2,529
Precio kWh [\$/kWh]		0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
TOTAL AHORRO EN ENERGÍA [USD]		236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236
REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO2													
Toneladas de CO2 no emitidas		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Precio de Ton CO2 [\$/ton]		8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18
TOTAL AHORRO EN CO2 [USD]		13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71
AHORRO EN GLP													
Consumo de GLP [# cilindros/año]		14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Precio de GLP [USD]		20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12	20.12
TOTAL AHORRO EN GLP [USD]		281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68	281.68
TOTAL AHORRO		531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34	531.34
COSTOS Y GASTOS													
Costos de Operación y mantenimiento		79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
FLUJO DE CAJA OPERATIVO		452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452
INVERSIÓN EN EL SISTEMA	- 15,772												
FLUJO DE CAJA LIBRE	- 15,772	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452

WACC	10.14%	
VAN (TASA DE DESCUENTO 10.14%)	- 11,540	
TIR	-13.51%	
INDICE BENEFICIO/COSTO	3,595.71	0.22
	16,305.9	

Fuente: Autor

CONCLUSIONES

La inclusión de equipos como las cocinas de inducción en el diario vivir de una sociedad, tan acostumbrada a cambios tecnológicos como lo es en la que nos desenvolvemos, podría ayudar a las generaciones más jóvenes a tener una rápida adaptación en el uso de este electrodoméstico, además que son equipos que permitirán incrementar los niveles de confort y seguridad inclusive en las poblaciones más vulnerables que recibirán por parte del Estado estos electrodomésticos.

El modelamiento matemático del funcionamiento de electrodomésticos se presenta aplicable a aquellos cuya operación no esta tan ligado a las costumbres del usuario, para el caso puntual de la cocina de inducción además de modelar los componentes eléctricos del electrodoméstico se debe considerar aspectos como: la región del país donde está instalada la cocina, la composición físico-química de los alimentos y algo tan subjetivo como lo es la sensación de que la comida se encuentra completamente cocida.

Junto con la modelación matemática del funcionamiento de equipos eléctricos, se vuelve indispensable realizar mediciones de los consumos realizados por los mismos, con la finalidad de respaldar los resultados obtenidos y la pertinencia de adoptar o no el modelo.

La utilización de micro redes de generación de electricidad se presentan como una buena alternativa para la alimentación de cargas puntuales, especialmente si estas presentan potencias nominales altas, debido a que además de liberar de potencia a las redes de distribución, aportan con la mitigación del cambio climático y contribuyen a la diversificación de la matriz energética del país.

Debido a lo variante de las condiciones climatológicas, se debe realizar todas las evaluaciones referentes a los sistemas fotovoltaicos considerando los datos de las peores circunstancias a las que este pueda estar sometido, de la misma manera se debe procurar buscar un lugar que beneficie el funcionamiento del mismo.

Al emplear una micro red fotovoltaica, como un sistema que busca liberar a la red pública de distribución de electricidad, es conveniente realizar un cambio en las costumbres en el uso de la electricidad, esto significa que aquellas actividades en las que se ocupen equipos con consumos altos deben hacerse coincidir con las horas en las que existe mayor cantidad de recurso solar y por ende se tiene la capacidad de generar mayor electricidad. Promoviendo de esta manera el uso de tarifas horarias.

En un sistema fotovoltaico como el propuesto en este trabajo, el nivel de independencia de la red que puede alcanzarse es directamente proporcional al tamaño del sistema de almacenamiento, pero considerando que la producción de baterías para sistemas fotovoltaicos es casi nula en el país y el costo elevado de las mismas, además de considerarse el subsidio aplicado al kWh en el país, se tiene que la mejor opción para cubrir los picos de demanda es recurrir a la red eléctrica pública.

El uso de micro sistemas de generación de electricidad a partir de energías renovables, deben ser destinados a suministrar electricidad no solamente a una carga sino a un grupo de cargas para de esta manera aumentar el índice de beneficio/costo para este tipo de instalaciones.

La gestión automática de la energía, propuesta en el modelo de operación permite garantizar una correcta interrelación entre el funcionamiento de la micro red fotovoltaica y la red, de esta manera se mejora la confiabilidad y continuidad del servicio. Es por esta razón que la implementación de estos modelos se vuelve indispensable en la integración de la generación distribuida con los sistemas eléctricos convencionales.

Es importante, incluir en los modelos de operación aplicados a sistemas de generación distribuida con almacenamiento de energía, una adecuada coordinación entre las horas del día y la entrega de energía, buscando de esta manera entregar esta energía en horas pico.

Sistemas como la micro red diseñada en este trabajo no pueden ser aplicados de manera inmediata en nuestro país, pero si se considera la tendencia que tiene los equipos que

conforman los sistemas fotovoltaicas en cuanto a disminuir su precio y mejorar su eficiencia es posible que en algunos años más resulte siendo tanto técnica como económicamente una solución real para liberar al Sistema Nacional Interconectado y ayudar a alcanzar niveles altos de soberanía energética.

RECOMENDACIONES

La toma de mediciones de parámetros eléctricos se presenta como la mejor opción para la construcción de curvas de demanda en equipos eléctricos, tomando esto en cuenta es conveniente medir el comportamiento de la cocina de inducción por un tiempo mínimo de un mes y considerando este comportamiento realizar nuevas simulaciones del sistema propuesto con la finalidad de confirmar los porcentajes de liberación de red mensuales así como una predicción anual más exacta de la energía que se deja de consumir gracias al uso de sistemas de generación distribuida.

Considerando que tanto para las variables meteorológicas se ha utilizado valores promedios en base a datos históricos y que en el caso del sistema fotovoltaico se usó modelos matemáticos que permiten tener un comportamiento aproximado del mismo, es conveniente realizar una validación de los resultados obtenidos con datos provenientes de la instalación fotovoltaica y estación meteorológica con las que cuenta la universidad.

Debido a que el plan gubernamental de sustitución de GLP no está solamente enfocado a los equipos de cocción, sino también a equipos de calentamiento de agua, sería provechoso repetir el estudio hecho pero incluyendo esta vez a equipos como: duchas o calefones eléctricos, los mismos que por las potencias nominales y el modo de uso que poseen representan una carga importante hacia las redes de distribución y el pago del servicio de electricidad.

Desarrollar estudios que permitan fijar precios para el costo del kWh óptimo producido por sistemas de generación distribuida instalados de manera autónoma en el sector residencial y que son entregados a la red. Este estudio deberá enfocarse en que el costo del kWh entregado en las horas de menor demanda no puede ser el mismo que aquel que entrega el usuario en las horas de mayor demanda, es decir la implementación de precios horarios.

Debido al alto costo actual de los equipos para sistemas de generación de electricidad a partir de energías renovables en el país, debido a que la gran mayoría de ellos son

importados, se vuelve necesaria la creación de políticas tributarias que eliminen los aranceles e impuestos aplicados a estos equipos fomentando de esta manera el uso de estos sistemas y dinamizando la economía del país.

Para un país como el nuestro que busca alcanzar el estado del buen vivir y la soberanía energética sería conveniente realizar estudios para determinar el punto exacto donde sea factible alcanzar la denominada “grid parity” o paridad de red, la misma que constituye el momento exacto en el cual empleando una fuente de generación por lo general de origen renovable, puede producirse electricidad a un precio igual o menor que el de la red pública.

Ante el crecimiento inmobiliario presente en los últimos años en Ecuador, sería ventajoso impulsar normas que exijan a las nuevas edificaciones, a cubrir una parte del consumo eléctrico con sistemas de generación distribuida. Haciendo que estos inmuebles ayuden a mejorar la confiabilidad de las redes de distribución y contribuyendo a la conservación del medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1] P. Traelmes and A. M. Villareal, “Métodos de cocción,” *Nutri Pro*, pp. 1–8, 2007.
- [2] J. Lagares, “Proceso de fabricación de productos cárnicos cocidos de músculo entero V: Cocción,” pp. 161–169.
- [3] D. Wiesenborn and R. Doddapaneni, “Cooking indices to predict screw-press performance for crambe seed,” *J. Am. ...*, vol. 78, no. 5, pp. 467–471, 2001.
- [4] M. Dehghan, Y. Rahmani, D. Domiri Ganji, S. Saedodin, M. S. Valipour, and S. Rashidi, “Convection–radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 448–455, Feb. 2015.
- [5] V. A. Kurganov, Y. A. Zeigarnik, and I. V. Maslakova, “Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants. Part IV: Problems of generalized heat transfer description, methods of predicting deteriorated heat transfer; empirical correlations; deteriorated heat transfer enhancement; dissol,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 77, pp. 1197–1212, Oct. 2014.
- [6] F. Incropera and D. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, Cuarta Edi. México: Pearson Education, 1999, p. 886.
- [7] R. W. Serth and T. G. Lestina, “2 – Convective and Radiative Heat Transfer,” in in *Process Heat Transfer*, 2014, pp. 31–65.
- [8] Q. J. Slaiman, M. M. Abu-Khader, and B. O. Hasan, “Prediction of Heat Transfer Coefficient Based on Eddy Diffusivity Concept,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 85, no. 4, pp. 455–464, Jan. 2007.
- [9] L. Yang, W. Chen, L. Luo, and X. Zhao, “Calculation of radiation heat transfer view factors among fuel rod bundles based on CFD method,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 71, pp. 462–466, Sep. 2014.
- [10] Y. Zhang, H.-L. Yi, and H.-P. Tan, “Natural element method for radiative heat transfer in two-dimensional semitransparent medium,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 411–423, Jan. 2013.
- [11] M. Cormick, “Northwestern Engineering,” 2014. [Online]. Available: <http://www.mech.northwestern.edu/courses/descriptions/377-heat-transfer.html>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [12] R. McKim, “Cooking with Philip Quinn,” *Int. J. Philos. Relig.*, vol. 71, no. 3, pp. 239–245, Oct. 2010.

- [13] T. Blessington, M. N. Nzaramba, D. C. Scheuring, A. L. Hale, L. Reddivari, and J. C. Miller, “Cooking Methods and Storage Treatments of Potato: Effects on Carotenoids, Antioxidant Activity, and Phenolics,” *Am. J. Potato Res.*, vol. 87, no. 6, pp. 479–491, Jul. 2010.
- [14] C. Vega and A. Sanghvi, “Cooking Literacy: Meringues as Culinary Scaffoldings,” *Food Biophys.*, vol. 7, no. 2, pp. 103–113, Feb. 2012.
- [15] GTZ, *Energía para cocinar: Por qué es importante si se desea reducir la pobreza a la mitad para el 2015*. 2015, p. 21.
- [16] E. Rehfuss and W. H. Organization, *Energía doméstica y salud: combustibles para una vida mejor*. 2007.
- [17] Carbunion, “¿ QUÉ ES EL CARBÓN?” [Online]. Available: <http://www.carbunion.com/>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [18] P. Gerling and H. Rempel, “Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002,” ... *Länderstudien, H. XXVIII, ...*, 2003.
- [19] R. Energy, “KEROSENE AND LIQUID PETROLEUM GAS (LPG),” *Practical Action Technology challenging poverty*, 1994.
- [20] A. Di Pelino, G. Vianco, F. Iglesias, P. Katz, and M. Daniele, “Informe Sobre La Situación Actual Del Gas Licuado De Petróleo,” Buenos Aires, 2002.
- [21] B. Liang, S. Balasubramanian, B. Wang, A. Yang, D. Kennedy, V. Le, J. Legaspi, and J. Southern, “LPG characterization and production quantification for oil and gas reservoirs,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 244–252, Nov. 2010.
- [22] M. G. Proaño Rodríguez, “Sistema Almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en la Planta Oyambaro – PETROCOMERCIAL,” Universidad Tecnológica Equinoccial, 2005.
- [23] O. Humphreys, “The design of domestic electric cookers,” *J. Inst. Electr. Eng.*, 1938.
- [24] J. Conant and P. Fadem, “A Community Guide to Environmental Health,” in in *A Community Guide to Environmental Health*, 2011, pp. 393–394.
- [25] A. Carlsson-kanyama and K. Boström-Carlsson, *Energy Use for Cooking and Other Stages in the Life Cycle of Food*, vol. 01, no. 160. 2001, pp. 1–33.
- [26] P. Boggavarapu, B. Ray, and R. V. Ravikrishna, “Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies,” *Fuel*, vol. 116, pp. 709–715, Jan. 2014.

- [27] P. Muthukumar and P. I. Shyamkumar, "Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications," *Fuel*, vol. 112, pp. 562–566, Oct. 2013.
- [28] INEC, "Combustible para Cocinar según Censo de Población y Vivienda 2010," Quito, 2010.
- [29] Teka, "Teka," 2014. [Online]. Available: <http://www.teka.com/products/>. [Accessed: 28-Aug-2014].
- [30] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, "Balance Energético Nacional 2013," Quito, 2013.
- [31] PETROECUADOR, "Informe cifras petroleras Período Enero - Noviembre 2014," Quito, 2015.
- [32] H. Cuevas, "Programa de Reforzamiento del Sistema de Distribución Eléctrica del Ecuador EC-L1136.Componente Gas Licuado a Presión(GLP)," Quito, 2014.
- [33] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, "Resumen Ejecutivo 'Plan Nacional de Cocción Eficiente'," 2013.
- [34] CONELEC, "Estudio De La Energía y Potencia De Cocinas Eléctricas Y Su Impacto En La Curva de Carga Diaria Del S.N.I. Período 2015-2022," Quito, 2013.
- [35] W. Arthur K.K. and F. N.K., "Experimental Study of Induction Cooker Fire Hazard," *Procedia Eng.*, vol. 52, pp. 13–22, Jan. 2013.
- [36] B. Congdon, "Popular Mechanics," 1956, p. 88, 1956.
- [37] O. Humphreys, "The design of domestic electric cookers," *J. Inst. Electr. Eng.*, 1938.
- [38] L. Milan, "Selector Magazine," 2014. [Online]. Available: <http://www.selectormagazine.com.au>. [Accessed: 01-Sep-2014].
- [39] B. Sazak and S. Cetin, "Reducing the number of measurements in induction cooker design," ... *Meas. Instruments, 2009. ICEMI' ...*, no. 1, pp. 450–454, 2009.
- [40] Y. Lu, K. Cheng, and K. Chan, "Development of a commercial induction cooker," ... *Appl. 2009 ...*, pp. 3–5, 2009.
- [41] P. Sadhu and N. Pal, "Review of induction cooking-a health hazards free tool to improve energy efficiency as compared to microwave oven," ... (*ICCAE*), 2010 2nd ..., vol. 5, pp. 650–654, Feb. 2010.

- [42] J. Everatt and G. Reid, “An overview of recent research,” *Routledge Companion to Dyslexia*, pp. 39–47, 2009.
- [43] J. Byun, K. Choi, H. Roh, and S. Hahn, “Optimal design procedure for a practical induction heating cooker,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 1390–1393, 2000.
- [44] J. Martínez, D. Vaca, M. Orozco, A. Montero, and D. Carrión, “Selección de Materiales Para Menaje de Cocinas de Inducción. Métodos Pugh. Dominic y Pahl Beitz,” *IX Congr. Cienc. y Tecnol. ESPE-2014*, 2014.
- [45] Fairchild, “AN-9012 Induction Heating System Topology Review,” 2000.
- [46] F. W. Sears, *Electricidad y Magnetismo*, 6th ed. 2009, p. 440.
- [47] M. Giménez, J. Riera, and A. Vidaurre, *Fundamentos Electromagnéticos de la Ingeniería*. Valencia, 2007, p. 306.
- [48] O. Semiconductor, “AND9166 / D Induction Cooking Everything You Need to Know,” 2014.
- [49] M. Guerra, J. Correa, I. Nuñez, and J. Scaron, *Física Elementos Fundamentales Campo electromagnético Campo gravitatorio*, Segunda. Barcelona: Reverté, 1985, p. 475.
- [50] S. Wentworth, “Calculating effective skin depth for thin conductive sheets,” *Antennas ...*, no. 1, pp. 4845–4848, 2006.
- [51] J. Van Bladel, “Foucault currents in a conducting sphere moving with constant velocity,” *IEE Proc. A (Physical Sci. Meas. ...)*, 1988.
- [52] K. Djellabi and M. Latreche, “Induction Heating Process Design Using Comsol® Multiphysics Software Version 4.2,” *waset.org*, no. 1, pp. 79–82, 2014.
- [53] A. Riofrio and D. Carrión, “Approach and Deployment of Distributed Generation. State-of-art Based on Induction Cooker System,” in *ANDESCON 2014*, 2014.
- [54] Y. Zhongming, “A half-bridge hybrid resonant inverter with novel pulse phase modulation control,” ... *Conf. 2006. PESC’ ...*, 2006.
- [55] N. a. Ahmed, Y. Miura, T. Ahmed, E. Hiraki, a. Eid, H. W. Lee, and M. Nakaoka, “Quasi-Resonant Dual Mode Soft Switching PWM and PDM High-Frequency Inverter with IH Load Resonant Tank,” *IEEE 36th Conf. Power Electron. Spec. 2005.*, pp. 2830–2835, 2005.

- [56] Ó. Jiménez, O. Lucia, I. Urriza, L. A. Barragan, and P. Mattavelli, “An FPGA-Based Gain-Scheduled Controller for Resonant Converters Applied to Induction Cooktops,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 4, pp. 2143–2152, 2014.
- [57] C.-M. Wang, C.-H. Su, M.-C. Jiang, and Y.-C. Lin, “A ZVS-PWM Single-Phase Inverter Using a Simple ZVS-PWM Commutation Cell,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 758–766, 2008.
- [58] M. Mezaroba, D. C. Martins, and I. Barbi, “A ZVS PWM inverter with active voltage clamping using the reverse recovery energy of the diodes,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 52, no. 10, pp. 2219–2226, Oct. 2005.
- [59] H. Ogiwara and M. Nakaoka, “ZCS high frequency inverter using SIT for induction heating applications,” *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, 2003.
- [60] J. Acero, C. Carretero, and I. Millán, “Analysis and modeling of planar concentric windings forming adaptable-diameter burners for induction heating appliances,” *Power Electron. ...*, vol. 26, no. 5, pp. 1546–1558, 2011.
- [61] J. Martínez, D. Vaca, M. Orozco, A. Montero, and D. Carrión, “Selección de materiales para menaje de cocinas de inducción. Métodos Pugh, Dominic y Pahl Beitz.,” *IX Congr. Cienc. y Tecnol.*, 2014.
- [62] D. Paesa and C. Franco, “Adaptive simmering control for domestic induction cookers,” *Ind. Appl. ...*, vol. 47, no. 5, pp. 2257–2267, 2011.
- [63] U. Shami, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A EFFICIENT COIL FOR A RESONANT HIGH FREQUENCY INVERTER FOR INDUCTION HEATING.,” *emo.org.tr*, no. V.
- [64] H. Chun-Liang, “Circuits analysis of inductive heating-device with half-bridge resonated inverter,” ... *11th WSEAS Int. Conf. Circuits- ...*, pp. 26–30, 2007.
- [65] P. Chamsuk and J. Srinonchat, “Study and Development Inductance Melting Control System Using low Energy,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 945–950, Jan. 2013.
- [66] J. Tena, *Circuitos electrotécnicos básicos: sistemas de carga y arranque: electromecánica de vehículos*. 2009, p. 312.
- [67] W. Hayt Jr., W. H. Hayt, J. Ellsworth, and S. M. Durbin, *Análisis de circuitos en Ingeniería*, Sexta. 2003, p. 827.
- [68] O. Katsuhiko, *Ingeniería de control moderna*, Quinta Edi. Madrid: McGRAW-HILL, 2010, p. 904.
- [69] T. Mathworks, “System Identification Toolbox™ Reference R 2014 b,” 2014.

- [70] M. M. Montero, “CÁLCULO INFORMATIZADO DE INDUCTORES,” *peandes.unex.es*.
- [71] VAXAS, “Tabla de resistividad eléctrica,” 2014. [Online]. Available: <http://www.vaxasoftware.com>. [Accessed: 27-Dec-2014].
- [72] A. Riofrio, D. Carrión, M. Orozco, D. Vaca, and J. Martínez, “ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN PROCESOS DE COCCIÓN EFICIENTE PARA EL SECTOR RESIDENCIAL,” in *COLIM*, 2014, pp. 1–6.
- [73] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: a definition,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, Apr. 2001.
- [74] S. P. Manríquez, “Análisis técnico-económico para la implementación de microredes eléctricas en Chile,” 2013.
- [75] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, Jan. 2011.
- [76] S. Villacis, “Análisis de factibilidad de utilizar colectores solares para el calentamiento de agua en el hospital Baca Ortiz en la ciudad de Quito,” Universidad Tecnológica Equinoccial, 2015.
- [77] M. García, *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*, Sexta. Madrid, 1999, p. 212.
- [78] MIPRO, “Reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 101 ‘Artefactos electrodomésticos para cocción por inducción’,” Quito, Ecuador, 14 153, 2014.
- [79] MEER, “Resumen Ejecutivo ‘Plan Nacional de Cocción Eficiente’,” Quito, 2013.
- [80] R. Calcina, “CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA POR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED A 3800 MSNM.,” *IV Conf. Lat. Am. Energía Sol. y XVII Simp. Peru. Energía Sol.*, pp. 1–5, 2011.
- [81] X. Yuan and Y. Zhang, “Status and opportunities of photovoltaic inverters in grid-tied and micro-grid systems,” ... *Conf. 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE ...*, pp. 0–3, 2006.
- [82] S. Pietruszko, “Analysis of the performance of grid connected photovoltaic system,” ... *Conf. (PVSC), 2009 ...*, pp. 48–51, 2009.
- [83] G. Salazar, “Comparación de la eficiencia entre los sistemas de generación fotovoltaicos conectados a la red y los sistemas aislados,” Universidad Politécnica Salesiana, 2014.

- [84] J. Herrera, “Sistema Híbrido Solar - Eólico para el abastecimiento del Centro Nacional de Control de Energía,” *Energía*, Quito, pp. 118–126, Jan-2013.
- [85] G. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*, Primera. New Jersey, 2013, p. 647.
- [86] O. M. Toledo, D. Oliveira Filho, and A. S. A. C. Diniz, “Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 506–511, Jan. 2010.
- [87] J. Mirez and H. Chamorro, “Energy management of distributed resources in microgrids,” *Circuits Syst. (...)*, 2014.
- [88] G. A. Rampinelli, A. Krenzinger, and F. Chenlo Romero, “Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34. pp. 578–587, 2014.
- [89] B. Sree Manju, R. Ramaprabha, and B. L. Mathur, “Modelling and control of standalone solar photovoltaic charging system,” in *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, ICETECT 2011*, 2011, pp. 78–81.
- [90] L. Castañer and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*. John Wiley & Sons, Ltd, 2002, p. xvi, 358 p.
- [91] CONELEC, “Pliego Tarifario para Empresas Eléctricas,” Quito, Ecuador, 2014.
- [92] Ecuador inmediato.com, “Kilovatio hora sube USD \$0.01 para sector residencial y \$0.02 para comercial, según CONELEC,” 2014. [Online]. Available: <http://ecuadorinmediato.com/>. [Accessed: 19-Jan-2015].
- [93] Ministerio del Ambiente (MAE), “Factor de Emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador,” Quito, 2013.
- [94] M. Monroy, “Políticas de Subsidio a los Combustibles en América Latina: El precio del GLP,” 2012.
- [95] Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH), “Comercialización de Gas Licuado de Pétroleo (GLP) en el Ecuador,” 2013.
- [96] A. Falk, C. Dürschner, and R. Karl-Heinz, *Photovoltaics for Professionals*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010, p. 215.
- [97] M. Boxwell, *Solar Electricity Handbook*, 2013 Editi. Warwickshire: Greenstream, 2013, p. 197.

- [98] N. Martín, *Integración de la Energía Fotovoltaica en Edificios*, Primera. Sevilla: PROGENSA, 2011, p. 65.
- [99] P. Fernández, “WACC: Definición, Interpretaciones Equivocadas y Errores,” *IESE*, [En línea]. Dispon. en [http://www.iese. ...](http://www.iese...), vol. 3, p. 17, 2011.
- [100] D. Ledenyov and V. Ledenyov, “On the risk management with application of econophysics analysis in central banks and financial institutions,” *arXiv Prepr. arXiv1211.4108*, pp. 1–10, 2012.
- [101] B. Bradley and M. Taqqu, “Financial risk and heavy tails,” ... *Heavy-Tailed Distrib. Financ. ...*, pp. 1–63, 2003.
- [102] Yahoo, “Market Data,” 2015. [Online]. Available: <http://finance.yahoo.com/>. [Accessed: 19-Jan-2015].
- [103] Bancon Central del Ecuador, “Banco Central del Ecuador,” 2015. [Online]. Available: <http://www.bce.fin.ec/>. [Accessed: 18-Jan-2015].
- [104] M. C. Tato, “El Valor Actual Neto (VAN) como criterio fundamental de evaluación de negocios. (Spanish),” *Econ. Desarro.*, vol. 128, no. 1, pp. 180–194, 2001.
- [105] U. M. A. O. Rtiz, D. T. Omasini, J. A. Dámoli, L. L. Ongo, U. Ortiz Martínez, D. Tomasini, J. Adámoli, and J. Longo, “Evaluación económico ambiental de un modelo de aprovechamiento sustentable de los bosques de Formosa, Argentina,” *Rev. la Fac. Agron. La Plata*, vol. 106, no. 1, pp. 97–108, 2006.
- [106] Sendeco2, “SENDECO2: Precios de CO2,” 2015. [Online]. Available: www.sendeco2.com. [Accessed: 20-Jan-2015].