

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DEL CONTROL PARA LA RESPUESTA DE
LA DEMANDA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO
NACIONAL”**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA

ELABORADO POR

ROCÍO DEL CARMEN CRUZ LÓPEZ

ASESOR

MSC. DANIEL CAMAC GUTIERREZ

LIMA - PERÚ

2014

Agradezco especialmente al CARELEC por el apoyo y la confianza depositados en mí para la realización de esta maestría.

A Dios por dármelo todo.

Agradecimiento

Agradezco a mi asesor, Msc. Daniel Cámac Gutierrez, por su valiosa guianza y motivación durante el desarrollo de la presente tesis.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

“Análisis de la Viabilidad del Control para la Respuesta de la Demanda en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional”

TESIS

Para optar el grado de Maestro en Ciencias
Mención: Sistemas de Potencia

Presentada por:
Rocío del Carmen Cruz López

Lima-Perú

Extracto

Diversos estudios se han llevado a cabo a nivel mundial, sobre todo en países de alto desarrollo tecnológico, sobre el potencial de la respuesta de la demanda en la eficiencia energética eléctrica y un especial énfasis en el nivel residencial cuyo comportamiento actual es inelástico además de muy representativo. En los últimas décadas se ha incorporado rápidamente la tecnología a nivel industrial logrando optimizar procesos y, en una extrapolación natural de esta tendencia, se ha desarrollado el concepto y prototipos de Smart Grids, o redes inteligentes, para lograr la interacción de cada una de las partes del sistema de distribución eléctrico a fin de optimizar cada sub-sistema aprovechando la información en tiempo real y el poder directo de los usuarios sobre la red, tanto en generación renovable y almacenamiento de energía, como en una respuesta directa de su consumo ante los precios.

Como uno de los primeros pasos de esta tendencia, se han desarrollado estudios del impacto de la respuesta de la demanda en diversos escenarios con diferentes perfiles de consumo, analizando su viabilidad para incorporarlos, a mediano plazo, como parte de un sistema Smart Grid.

Actualmente en el Perú, se encuentran proyectos de ley en espera para la implementación del control de la demanda como el primer paso de una iniciativa

gubernamental en búsqueda de la optimización del sistema energético peruano basados en la inherente baja eficiencia de la generación y transmisión, así como en el reconocimiento del potencial de la respuesta de la demanda residencial dado su comportamiento inelástico actual y el hecho que representa casi el 50% del consumo eléctrico nacional.

Palabras claves: Demanda Residencial Peruana, Control de Demanda, Control On-Off, Factor de Coincidencia, Smart Grids.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Viability Analysis for Demand Response Control in National Interconnected
Electric System

THESIS

Requirement for the degree of Master in Science
Field: Power Systems

by:
Rocío del Carmen Cruz López

Lima-Peru

Abstract

Several researches have been developed in the World, overall in high level technology countries, about the demand response potential over the electric energy efficiency with a special emphasis in residential level whose current behavior is yet inelastic besides highly representative. Over the last decades, technology have been quickly included at industrial level, making possible the processes optimization and, in a natural extrapolation of this tendency, Smart Grid concepts and prototypes have been developed, in order to achieve the integral interaction between the components of the electric distribution system (including consumers, obviously) to optimize each single sub-system taking advantage from the real time information and the actual power the consumers have over the electric network; not only concerning renewable energy but also in energy storage, as a direct response to prices.

As one of the first steps toward this tendency, demand response studies have been developed including these inside sceneries with different consumes profiles, analyzing their viability in order to include them, in a mid-term, as a part of a Smart Grid System.

Currently in Peru, law projects are about being approved concerning the implementation of demand control as the first step of a governmental initiative to

optimize the Peruvian energy system, mainly because of the inherent low efficiency of the generation and transmission, as well as the awareness of the residential consumer potential taking account its size and yet inelastic behavior.

Key Words: Peruvian Residential Demand, Demand Side Management, On-Off Control, Coincidence Factor, Smart Grids.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| A. Motivación | 1 |
| B. Revisión Bibliográfica | 2 |
| C. Objetivo..... | 2 |
| D. Alcance de la Tesis..... | 3 |
| E. Estructura del Trabajo..... | 3 |
| | |
| Capítulo 1: El Sistema Eléctrico Peruano | 5 |
| 1.1 Estado del Arte del Sistema Eléctrico Peruano..... | 5 |
| 1.1.1 Situación Actual..... | 5 |
| 1.1.2 El Mercado Eléctrico..... | 10 |
| 1.1.3 Marco Normativo..... | 10 |
| 1.1.4 FOSE..... | 11 |
| 1.1.5 Principales Actores del Subsector Eléctrico..... | 13 |
| 1.2 Balance Oferta / Demanda..... | 15 |
| | |
| Capítulo 2: DSM y Smart Grids | 19 |
| 2.1. DSM..... | 19 |
| 2.1.1 Beneficios del DSM..... | 20 |
| 2.1.2 Objetivos del DSM..... | 22 |
| 2.1.3 Programas DSM..... | 24 |
| 2.1.4 Barreras y Recomendaciones para el DSM..... | 24 |
| 2.1.4.1. Políticas para el incentivo del DSM..... | 28 |
| 2.1.5. Experiencias Internacionales..... | 31 |
| 2.1.6. Implicancias para la Implementación de DSM en Países en Desarrollo | 33 |
| 2.2. Smart Grids..... | 35 |
| 2.2.4. Características Principales de los Smart Grids..... | 37 |
| 2.2.5. Barrera en el Desarrollo de Smart Grids..... | 38 |
| | |
| Capítulo 3: El Consumidor Residencial Peruano | 40 |
| 3.1. Factores Determinantes en el Consumo Eléctrico Residencial..... | 40 |
| 3.1.1. Patrones Geográficos..... | 41 |
| 3.1.2. Patrones de Tenencia de Electrodomésticos..... | 42 |
| 3.1.3. Patrones de Permanencia en el Hogar..... | 43 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.4. Patrones de Utilización de Electrodomésticos..... | 44 |
| 3.1.5. Patrones Climáticos..... | 44 |
| 3.1.6. Patrones Culturales..... | 45 |
| 3.1.7. Patrones Socioeconómicos..... | 45 |
| 3.2. Métodos de Modelamiento de Consumo Eléctrico Residencial..... | 46 |
| 3.2.1 Método Simple Tipo Clúster..... | 47 |
| 3.2.2 Modelo Tridimensional..... | 54 |
| 3.2.3 Modelamiento Redes Neuronales..... | 56 |
| 3.3 Información Estadística del Consumidor Residencial Peruano..... | 57 |
| Capítulo 4: Programas de Control de la Demanda | 62 |
| 4.1. Principales Estrategias de Control DSM..... | 62 |
| 4.1.1. Respuesta del Consumidor a los Programas de Precio Dinámicos. | 68 |
| 4.1.2. Factor de Coincidencia..... | 69 |
| Capítulo 5: Resultados | 71 |
| 5.1. Descripción de la Aplicación..... | 71 |
| 5.2. Modelo Propuesto..... | 72 |
| 5.3. Estrategia de Control Propuesta..... | 93 |
| 5.4. Análisis de la Viabilidad de Implementación del Control Propuesto..... | 115 |
| Conclusiones y Recomendaciones | 117 |
| Referencias Bibliográficas | 119 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Distribución nacional de las principales centrales eléctricas en el Perú..... | 7 |
| 1.2 | Producción histórica anual de energía eléctrica a nivel nacional..... | 10 |
| 2.1 | Beneficios del DSM..... | 21 |
| 2.2 | Objetivos DSM..... | 23 |
| 2.3 | <i>Timewise</i> y reporte para usuario final con consumos por hora..... | 33 |
| 2.4 | Estructura Smart Grid..... | 35 |
| 2.5 | Clasificación de los Smart Grids..... | 36 |
| 2.6 | Smart Grid vs Sistema Tradicional..... | 36 |
| 2.7 | Arquitectura propuesta por GE optimizar la demanda para Smart Grid..... | 37 |
| 2.8 | Arquitectura propuesta por GE para la integración de ER en los Smart Grid..... | 38 |
| 3.1 | Clasificación de información recopilada en campo..... | 47 |
| 3.2 | Diagrama de Flujo para la generación de un Perfil Específico por método clúster...50 | |
| 3.3 | Diagrama de flujo para el perfil típico por método clúster.....51 | |
| 3.4 | Diagrama de flujo para generar el perfil regional por método clúster..... | 51 |
| 3.5 | Arquetipo tridimensional para el modelo de consumo de energía residencial..... | 55 |
| 3.6 | Red neuronal para el modelamiento de la carga eléctrica residencial..... | 56 |
| 3.7 | Facturación por venta de energía eléctrica por sectores 2011..... | 59 |
| 4.1 | Frecuencia de Contingencias por magnitud..... | 63 |
| 4.2 | Respuestas esperadas del DSM en función del tipo y horizonte del problema..... | 63 |
| 4.3 | Representación esquemática de programas de corte de carga centralizado..... | 65 |
| 4.4 | Factor de coincidencia en función del número de casas..... | 70 |
| 5.1 | Clasificación del público <i>target</i> por tenencia de cargas eléctricas. | 75 |
| 5.2 | Distribución horaria de las curvas de cargas residenciales en Ecuador. | 78 |
| 5.3 | Aportes de las cargas en las horas de máxima demanda. | 79 |
| 5.4 | Agrupamiento de patrones para modelamiento del consumidor residencial. | 82 |
| 5.5 | Diagrama de flujo de tenencia y pertenencia a escenario – Día Laborable. | 83 |
| 5.6 | Diagrama de flujo de cálculo de matriz energética por escenario – Día Laborable.. | 84 |
| 5.7 | Diagrama de flujo de para agregación – Día Laborable. | 85 |
| 5.8 | Diagrama de flujo de tenencia– Día No Laborable. | 86 |
| 5.9 | Diagrama flujo de cálculo de matriz energética por escenario – Día No Laborable. | 87 |
| 5.10 | Diagrama de flujo de para agregación – Día No Laborable. | 88 |
| 5.11 | Consumos por escenarios Lunes a Viernes – Estación Cálida. | 89 |
| 5.12 | Consumos agregado Lunes a Viernes – Estación Cálida. | 89 |

| | |
|---|-----|
| 5.13 Consumos agregados Días No Laborables – Estación Cálida. | 90 |
| 5.14 Consumos por escenarios Lunes a Viernes – Estación Fría. | 90 |
| 5.15 Consumos agregado Lunes a Viernes – Estación Fría. | 91 |
| 5.16 Consumos agregados Días No Laborables – Estación Fría. | 91 |
| 5.17 Diagrama de flujo para el cálculo del factor de coincidencia. | 92 |
| 5.18 Diagrama de bloques del control propuesto. | 96 |
| 5.19 Diagrama de flujo del sistema de control. | 97 |
| 5.20 Respuesta a Mcont=5% Día Laborable Cálido. | 99 |
| 5.21 Respuesta a Mcont=10% Día Laborable Cálido. | 100 |
| 5.22 Respuesta a Mcont=15% Día Laborable Cálido. | 100 |
| 5.23 Respuesta a Mcont=20% Día Laborable Cálido. | 101 |
| 5.24 Respuesta a Mcont=25% Día Laborable Cálido. | 101 |
| 5.25 Respuesta a Mcont=30% Día Laborable Cálido. | 102 |
| 5.26 Respuesta a Mcont=5% Día No Laborable Cálido. | 102 |
| 5.27 Respuesta a Mcont=10% Día No Laborable Cálido. | 103 |
| 5.28 Respuesta a Mcont=15% Día No Laborable Cálido. | 103 |
| 5.29 Respuesta a Mcont=20% Día No Laborable Cálido. | 104 |
| 5.30 Respuesta a Mcont=25% Día No Laborable Cálido. | 104 |
| 5.31 Respuesta a Mcont=30% Día No Laborable Cálido. | 105 |
| 5.32 Respuesta a Mcont=5% Día Laborable Frío. | 105 |
| 5.33 Respuesta a Mcont=10% Día Laborable Frío. | 106 |
| 5.34 Respuesta a Mcont=15% Día Laborable Frío. | 106 |
| 5.35 Respuesta a Mcont=20% Día Laborable Frío. | 107 |
| 5.36 Respuesta a Mcont=25% Día Laborable Frío. | 107 |
| 5.37 Respuesta a Mcont=30% Día Laborable Frío. | 108 |
| 5.38 Respuesta a Mcont=5% Día No Laborable Frío. | 108 |
| 5.39 Respuesta a Mcont=10% Día No Laborable Frío. | 109 |
| 5.40 Respuesta a Mcont=15% Día No Laborable Frío. | 109 |
| 5.41 Respuesta a Mcont=20% Día No Laborable Frío. | 110 |
| 5.42 Respuesta a Mcont=25% Día No Laborable Frío. | 110 |
| 5.43 Respuesta a Mcont=30% Día No Laborable Frío. | 111 |

Lista de Tablas

| | |
|--|-----|
| 1.1 Principales indicadores del subsector eléctrico nacional 2012..... | 6 |
| 1.2 Principales indicadores del mercado eléctrico al 2012. Fuente MEM..... | 6 |
| 1.3 Proyección de la demanda del SEIN 2013-2017..... | 15 |
| 1.4 Proyección de la Oferta 2013-2017..... | 16 |
| 1.5 Balance Oferta – Demanda 2013-2017..... | 17 |
| 2.1 Barreras para el DSM en el sector residencial..... | 26 |
| 3.1 Escenarios de Ocupación para método clúster..... | 49 |
| 3.2 Atributos de los arquetipos de consumidores energéticos residenciales..... | 55 |
| 3.3 Proyección de los factores demográficos 2010-2030..... | 58 |
| 3.4 Uso final de energía en sector residencial. | 60 |
| 3.5 Saturación (%) de bienes de consumo intensivo del hogar por departamentos..... | 61 |
| 5.1 Escenarios de Permanencia en Hogares Limeños..... | 76 |
| 5.2 Tiempos de uso de principales consumidores eléctricos residenciales. | 77 |
| 5.3 Rango de temperaturas para aire acondicionado por estación. | 80 |
| 5.4 Rango de parámetros para aire acondicionado. | 80 |
| 5.5 Rango de parámetros para electrodomésticos DHW. | 81 |
| 5.6 Valor de los parámetros para electrodomésticos DHW..... | 81 |
| 5.7 Volúmenes diarios de consumo de agua de electrodomésticos DHW. | 82 |
| 5.8 Factores de coincidencia obtenidos..... | 93 |
| 5.9: Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Cálida. | 98 |
| 5.10 Valores obtenidos del control: Días No Laborables Estación Cálida. | 98 |
| 5.11 Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Fría. | 98 |
| 5.12 Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Fría. | 99 |
| 5.13 Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Cálida. | 112 |
| 5.14 Impacto al usuario final en Días No Laborables – Estación Cálida. | 113 |
| 5.15 Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Fría. | 113 |
| 5.16 Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Fría. | 113 |

Terminología

La nomenclatura utilizada es:

- **DSM:** Demand Side Management;
- **EE:** Eficiencia Energética;
- **ER:** Energía Renovable;
- **SEIN:** Sistema Eléctrico Interconectado Nacional;
- **MINEM - MEM:** Ministerio de Energía y Minas;
- **COES:** Comité de Operación Económica del Sistema;
- **REP:** Red de Energía del Perú;
- **FOSE:** Fondo Social de Compensación Eléctrica;
- **ENAHO:** Encuesta Nacional de Hogares;
- **SISFOH:** Sistema de Focalización de Hogares;
- **INEI:** Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- **OSINERMING:** Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería;
- **GART:** Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria;
- **DGAEE:** Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos;
- **MMPCD:** Millones de Pies Cúbicos Diarios.
- **CENERGIA:** Centro de Conservación de Energía y del Ambiente;
- **LCE:** Low Carbon Economy;

INTRODUCCIÓN

A. Motivación

El sistema eléctrico peruano es un sistema hidro-térmico, con un componente del 60% aproximado correspondiente a centrales hidroeléctricas, siendo por lo tanto, sensible a la incertidumbre hidrológica; lo que a su vez hace necesaria la instalación de centrales “frías” que permitan cumplir con los requerimientos de la demanda que no sean cubiertos por las centrales hidroeléctricas debido a sus vicisitudes inherentes. Esta incertidumbre puede ser también extrapolada en escenarios de riesgo con centrales dependientes de gas natural, dado que este recurso podría también estar sujeto a indisponibilidades temporales. Por el momento, la potencialidad de las energías renovables en el Perú, con excepción de la hidroeléctrica, no es considerada como considerable en el mercado eléctrico nacional; y por tanto, aún no son tomadas en cuenta.

Considerando que en los últimos años la demanda energética nacional se ha incrementado notablemente, se ha hecho mandataria la inversión constante en el desarrollo de proyectos de generación con tecnología avanzada; aunque estas han sido a la fecha insuficientes para lograr los márgenes de reserva recomendados (20 a 30%). En horas punta, por ejemplo, la demanda máxima de potencia alcanzó, en marzo del 2013, los 5355MW aproximadamente. La potencia instalada, por su parte, es de 6963MW, siendo 65% provista por centrales hidroeléctricas, lo que muestra la vulnerabilidad de la situación energética peruana. Si a esto añadimos el hecho de que, la transmisión y generación tienen, en conjunto, una eficiencia menor al 80%; se hace más visible un componente hasta el momento no tomado en cuenta para la mejora integral del sistema eléctrico: la demanda.

Al momento, la demanda residencial es el principal causante de las “horas punta”, y además inelástica e insensible a la volatilidad de precios; no por indiferencia sino por desconocimiento y por carencia de medios. La demanda residencial representa cerca de la cuarta parte del consumo eléctrico nacional y es una fuente disponible, en mercados de escala, para el incremento de la confiabilidad del sistema eléctrico nacional; y no es tomada en cuenta de manera activa y tecnológica aún; existiendo por el momento, sólo programas de concientización orientados a factores conductuales.

B. Revisión Bibliográfica

La presente tesis aborda los conceptos de administración de la demanda con el objetivo específico de reducir el factor de coincidencia [15] del consumidor residencial peruano ante contingencias.

El trabajo comienza con un acercamiento general al sistema eléctrico peruano, reconociendo la problemática, información estadística y proyecciones principales [26, 27, 28] a fin de orientar las acciones de control a la optimización operativo del mismo. Los principales actores y la normativa vigente delimitan, de cierta forma, las opciones disponibles y las barreras y oportunidades existentes para la implementación de programas DSM [32], aprovechando además la experiencia internacional al respecto [3, 33].

Para el modelamiento del consumo residencial se toman en cuenta diversos factores [4, 9, 10, 11, 19, 20] clasificados, de forma general, en físicos y conductuales [13]. Existen diversas propuestas de modelamiento en función de la relevancia de estos factores y de la información disponible [7,12, 22, 23], y del objetivo de control al que están orientados. El Método Simple Tipo Grupos [12] es analizado a detalle por sus características atractivas, y aplicado con ciertas adaptaciones basadas en información estadística y cálculos econométricos previos [16, 20, 24].

Con el modelamiento obtenido, se establece el programa DSM adecuado. Si bien todos los programas están orientados a la modificación de la curva de carga [2], existen diferentes métodos para lograrlo [18,34] en función de los recursos, tecnología y “concientización” disponible.

Dado que los consumidores finales son los actores claves de los sistemas DSM, es de suma importancia minimizar los impactos sobre su *confort*, a fin de asegurar su inclusión y posterior permanencia en los programas [14].

Los efectos sobre el factor de coincidencia y el *confort* del usuario, son calculados mediante simulaciones en el software MATLAB y ante diferentes magnitudes de contingencias.

C. Objetivo

Este trabajo busca analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación de una estrategia de control a nivel de demanda (DSM) en el consumidor residencial peruano, a fin de mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico nacional ante contingencias, expresadas en términos de factor de coincidencia.

Para ello se tomará como referencia trabajos previos realizados en otros países, las características particulares del consumidor residencial peruano y algunos supuestos basados en estadísticas nacionales e internacionales. La estrategia de control implementada debe tomar en cuenta la minimización de impacto negativo sobre el *confort* del usuario final. La propuesta de este trabajo determina los requerimientos técnicos y conductuales necesarios para una implementación básica y óptima en la reutilización de la infraestructura de los consumidores. El análisis toma en cuenta los supuestos, alcances y limitaciones de la propuesta de control para comparar el valor de la inversión requerida con los beneficios económicos que se conseguirían con ella; así como los efectos sobre el *confort* del usuario final.

D. Alcance de la Tesis

Este trabajo considera:

- Análisis técnico de una propuesta de programa DSM considerando únicamente la infraestructura de implementación macro, sin considerar lo requerido para el mantenimiento, puesta en marcha, entre otros. No incluye el cálculo ni la estimación de ningún tipo de costos.
- El análisis tiene como base el factor de mejora del factor de coincidencia ante contingencias e incluye su relación con el impacto al *confort* para el usuario final.
- Esta tesis se enfoca únicamente en el consumidor residencial peruano representativo del SEIN.
- El modelamiento del consumidor residencial planteado en esta tesis no contempla cargas como iluminación, refrigeración y electrodomésticos varios, que sean de bajo consumo o con impacto negativo en el *confort* del usuario final.
- Las suposiciones tecnológicas y de conducta, están basadas en información demográfica y proyecciones para un periodo de implementación de corto plazo (cinco años).

E. Estructura del Trabajo

El contenido de la tesis está organizado en la introducción, 5 capítulos y las recomendaciones y conclusiones.

En la introducción se presenta, de manera general y macro, la problemática que se pretende atacar con la tesis, se delimita el alcance de este trabajo y se expone el objetivo esperado. Esta también incluye la revisión de la bibliografía consultada.

El capítulo 1 muestra una fotografía del sistema eléctrico peruano con un énfasis en la distribución eléctrica, información histórica de máximas demandas, potencia útil,

fuentes de energía consideradas, capacidad instalada de generación, marco normativo y un balance oferta/demanda. En este capítulo se presenta información histórica, actual y proyectada del SEIN.

En el capítulo 2 se introduce el concepto de DSM, su evolución internacional, objetivos, alcances y oportunidades; para ser tomadas en consideración en la aplicación local. Se listan también las recomendaciones para minimizar el impacto de las barreras de su implementación; en función de experiencias internacionales y locales y se introduce la adaptación de este concepto en la coyuntura peruana. En este capítulo también se presenta el concepto de Red Inteligente como el global al que el resultado de esta tesis, pretende formar parte en un futuro cercano.

En el capítulo 3 se presentan las principales características de los consumidores residenciales así como los factores que influyen directamente en su comportamiento. Este capítulo incluye también algunos métodos de modelamiento presentados en trabajos internacionales. Por último, se muestran valores estadísticos del consumidor residencial peruano, potencialmente influyentes en su comportamiento energético.

En el capítulo 4 se detallan los principales programa DSM, sus ventajas y limitaciones y se presentan las pautas preliminares para la elección del programa propuesto en este trabajo. Este capítulo incluye los escenarios de implementación normalmente considerados en los programas DSM y sobre los cuales se realizan sus análisis costo-beneficio.

El capítulo 5 inicia presentando el caso de aplicación sobre el cual se desarrolla la tesis, delimitando las condiciones y alcance de su implementación. Presenta además la metodología para el modelamiento del consumidor residencial peruano incluyendo los supuestos, información utilizada, escenarios y cálculos necesarios. El alcance y las limitaciones de este modelamiento son también listados en este capítulo. Las consideraciones de diseño del programa de control propuesto sobre el modelo antes descrito así como los requerimientos técnicos, son abordadas considerando previamente la selección del público *objetivo* ubicados en zonas de alta demanda a fin de optimizar, al menos probabilísticamente, la inversión tecnológica requerida. Por último, se estima un cálculo económico de la implementación como parte de futuros análisis costo-beneficio.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros, sobre todo en función de los logros tecnológicos esperados para la integración y optimización de las implementaciones en el sistema eléctrico peruano.

CAPÍTULO I

EL SISTEMA ELÉCTRICO PERUANO

Este capítulo presenta las principales características del mercado eléctrico peruano, las normas que lo rigen, sus principales falencias, estructura y oportunidades.

1.1 Estado del Arte del Sistema Eléctrico Peruano

1.1.1 Situación Actual

En los últimos 7 años, la electricidad ha representado, en promedio, el 18% de la energía final que se consume en el Perú. Durante el mismo periodo, la demanda de electricidad creció 7% en promedio anual.

Este crecimiento sostenido refleja las buenas condiciones macroeconómicas del país –7% crecimiento del PBI–, pese a la crisis económica internacional.

En el ámbito nacional, las actividades económicas de gran consumo eléctrico fueron la industria minera, los sectores manufactura y construcción [26]. Con relación a los sectores que consumen más energía está el transporte (39%), seguido por el grupo de la actividad residencial, comercial y de servicio público (31%), y el grupo de la industria y la minería (25%) [27].

Los principales indicadores del subsector eléctrico nacional al 2012 se muestran en la tabla 1.1. La tabla 1.2 muestra los principales indicadores del mercado eléctrico al 2012.

La infraestructura necesaria actual para llevar electricidad a los usuarios finales abarca:

- Generación: Están dispersas en el territorio nacional y producen electricidad a partir de la transformación de un fuente de energía térmica, química, mecánica, luminosa, etc. Esta es una actividad potencialmente competitiva, donde existen varias tecnologías (hidroeléctricas y térmicas). Actualmente en el Perú existen 27 empresas de generación; siendo las más representativas EDEGEL, ELECTROPERÚ, ENERGÍA DEL SUR, EGENOR, con una participación mayor de la empresa privada. La figura 1.1 muestra la distribución nacional de las principales centrales eléctricas en el Perú. La capacidad actual de generación de electricidad está dividida de manera uniforme entre las fuentes de energía térmica e

hidroeléctrica, con un reciente dinamismo en el sector eléctrico del país, basado en el cambio por plantas a gas natural, fomentado por el gas de Camisea.

Tabla 1.1: Principales indicadores del subsector eléctrico al 2012. Fuente MEM.

| Nivel nacional | | |
|---|----------------|----------------------|
| Población | | 29.8 millones |
| Participación de la electricidad en el consumo final de energía | | 17.7% |
| Coeficiente de electricidad | | 80% |
| Consumo final de electricidad (Venta final+Autoprodutores) | | 34 GW.h |
| Consumo per capita | | 1 149 kW.h/habitante |
| Producción de electricidad | | 39 TW.h |
| | Hidroeléctrica | 56% |
| | Termoeléctrica | 44% |
| Potencia Instalada | | 9 GW |
| | Hidroeléctrica | 40% |
| | Termoeléctrica | 60% |
| Potencia efectiva | | 8 GW |
| | Hidroeléctrica | 42% |
| | Termoeléctrica | 58% |
| Eficiencia del subsector eléctrico | | 88% |
| Lineas de transmisión | | 11382 km |
| | 500 kV | 89 km |
| | 220 kV | 6850 km |
| | 138 kV | 4443 km |

Tabla 1.2: Principales indicadores del mercado eléctrico al 2012. Fuente MEM.

| Mercado eléctrico | | |
|---|----------------|--------------------|
| Número de clientes finales | | 5.5 millones |
| Consumo final de electricidad (Venta final) | | 32 TW.h |
| Facturación por venta final | | 2780 millones US\$ |
| Precio medio de electricidad | | 9 ctvo US\$/KW.h |
| Producción de electricidad | | 36 TW.h |
| | Hidroeléctrica | 58% |
| | Termoeléctrica | 42% |
| Potencia efectiva | | 7 GW |
| | Hidroeléctrica | 47% |
| | Termoeléctrica | 53% |
| COES-SEIN del Mercado eléctrico | | |
| Potencia efectiva | | 6 GW |
| Máxima demanda del SEIN | | 5 GW |
| Margen de reserva del SEIN | | 31% |

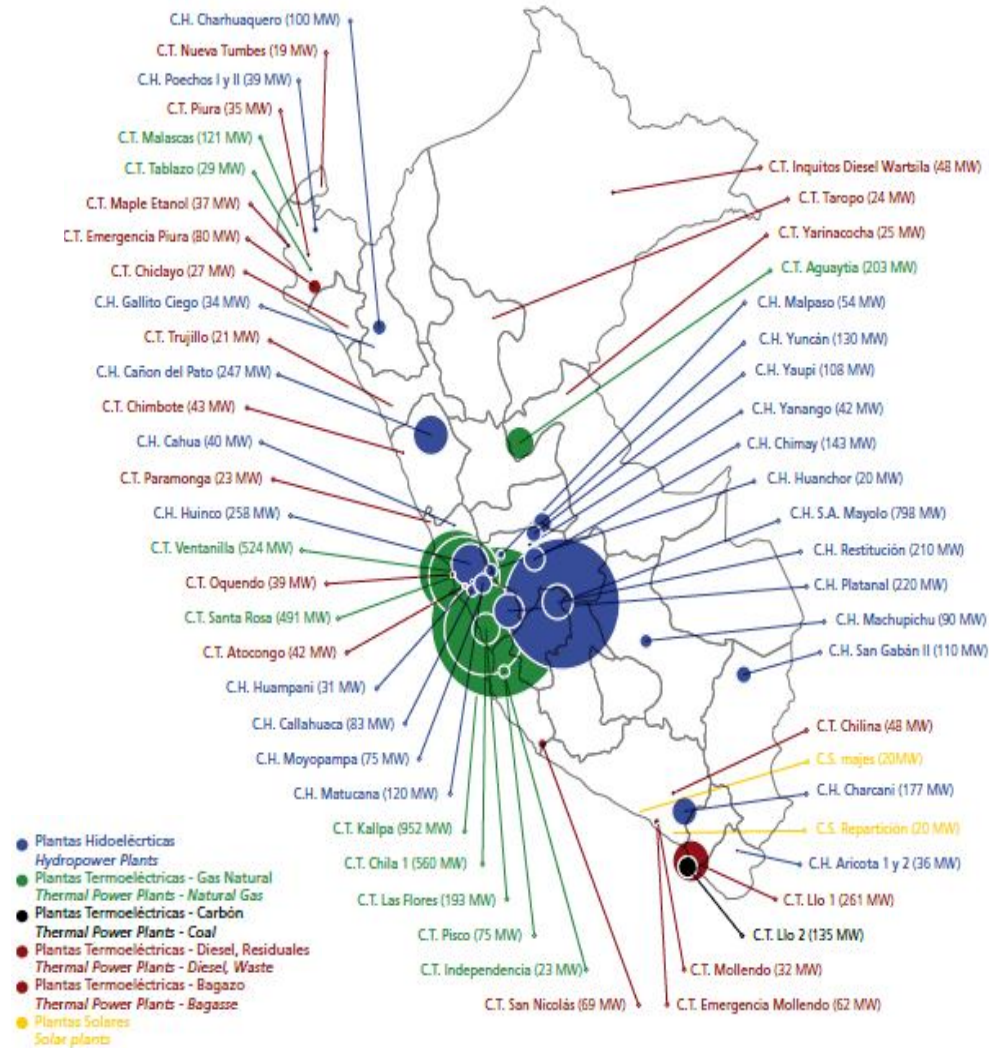


Figura 1.1: Distribución nacional de las principales centrales eléctricas en el Perú.

Fuente Documento Promotor 2012 MEM.

- **Transmisión:** Encargadas de conducir la energía generada a través de líneas de transmisión de 500, 220 y 138 kV hasta los sistemas de distribución. Las empresas transmisoras poseen un extenso alcance territorial que puede llegar a cubrir varias regiones. Los sistemas de distribución permiten transportar la electricidad proveniente de los sistemas de transmisión hasta los usuarios finales, su operación está a cargo del COES que busca lograr el equilibrio entre la oferta y la demanda, conformada por los agentes del sistema. En el Perú existe un plan de inversiones en transmisión que es licitado, ganando las empresas que ofertan los menores costos. Actualmente, el Perú cuenta con 7 empresas de transmisión, siendo la más importante REP.

- Distribución: Se da en un espacio territorial específico, sea ciudad, distrito o población. Las empresas de distribución son monopolios naturales regionales, regulados mediante un esquema de incentivos, que principalmente se explican por la densidad de los clientes: es menos costoso el suministro unitario para una zona de concesión con alta densidad que uno con baja densidad. Tradicionalmente ha sido regulada con la metodología del 'costo del servicio', aunque desde mediados de los 80's se reconoce la necesidad de crear incentivos a la eficiencia y no reconocer los costos presentados por los concesionarios, es decir, ineficiencias productivas. Las tarifas de la distribución se fijan conceptualmente en base a un costo medio eficiente que resulta de la provisión adecuada de incentivos para la reducción de costos y se reducen los problemas de sobre-capitalización usando el concepto de 'empresa modelo' basado en reconocer costos eficientes para las distintas empresas y se definen sistemas eléctricos típicos (basados en densidad de instalaciones, clientes y carga), siendo el OSINERGMIN la entidad encargada de definir las características y número de sectores (actualmente son 6), sobre la base de los cuales se calculan los costos eficientes del suministro. La tarifa de distribución se calcula cada cuatro años y considera los costos asociados al usuario independiente del consumo, las pérdidas estándar de energía y potencia, los costos estándar de inversión, operación y mantenimiento por unidad de demanda suministrada (VAD) y los costos asociados al usuario independientes del consumo son los siguientes: lectura de medidor, procesamiento de factura, reparto de factura y cobranza de factura.

Respecto a las pérdidas, en el reglamento de la LCE se estableció que las empresas deberían alcanzar un nivel estándar luego de tres fijaciones tarifarias. En la primera fijación se deberá reducir por lo menos el 50% de la diferencia entre las pérdidas reales y las pérdidas estándares. Este cronograma preanunciado de reducción de pérdidas reconocidas en las tarifas generó incentivos en las empresas para alcanzar niveles de pérdidas incluso menores a las reconocidas, pues en caso contrario incurrían en pérdidas financieras. Las pérdidas que más se redujeron fueron las pérdidas no técnicas (robos de energía).

Para la formación de tarifas para los clientes residenciales, en la práctica, los clientes de servicio público o regulado tienen a su disposición diferentes opciones tarifarias en las cuales, en base a una serie de factores que consideran sus patrones de consumo, se transfieren todos los costos de provisión del servicio. La elección de las opciones tarifarias dependerá del nivel de tensión, patrón de carga y equipos de medición. La mayor parte de los clientes regulados (91.5%) se encuentran en la opción tarifaria BT5, diseñada para los clientes residenciales, que

consiste en un cargo por energía unitario, y un cargo fijo mensual, además de los costos de alumbrado y reposición y mantenimiento de conexión. En estos cargos se incluyen los subsidios cruzados entre consumidores (los que consumen más de 100kWh subsidian a los que consumen menos de 100kWh). La expansión de los sistemas de distribución está sujeta a varios factores tales como:

- Los costos incrementales de los nuevos suministros.
- El consumo per cápita de los nuevos usuarios (usualmente menos del 20% del promedio)
- La capacidad de pago de los potenciales usuarios.

Por su parte, el Estado promueve incentivos explícitos para la mejora de los indicadores de calidad de servicio en lo relativo a interrupciones y niveles de satisfacción de los clientes, así como un índice de calidad comercial.

La producción mensual a nivel nacional en marzo del año 2013 se calculó en 3,682GWh, 4,9% mayor que la producción del mismo mes del año anterior. Con relación a marzo 2011, fue superior en 11,2%, y con respecto al año 2010 aumentó 19,9%. La producción de energía eléctrica anual a nivel nacional, se muestra en la figura 1.2.

La máxima demanda del SEIN en marzo del año 2013 fue 5,355MW, cifra que representa un crecimiento del 5,0% respecto al mes de marzo del año 2012. Los incrementos de la máxima demanda de marzo respecto a los años 2011, 2010 y 2009 fueron de 13,6%, 20,3% y 28,9% respectivamente.

El SEIN abastece al 85% de la población conectada, con varios sistemas 'aislados' que cubren el resto del país. A pesar de que la inversión en generación, transmisión y distribución en las áreas urbanas es principalmente privada, los recursos para la electrificación rural provienen únicamente de recursos públicos.

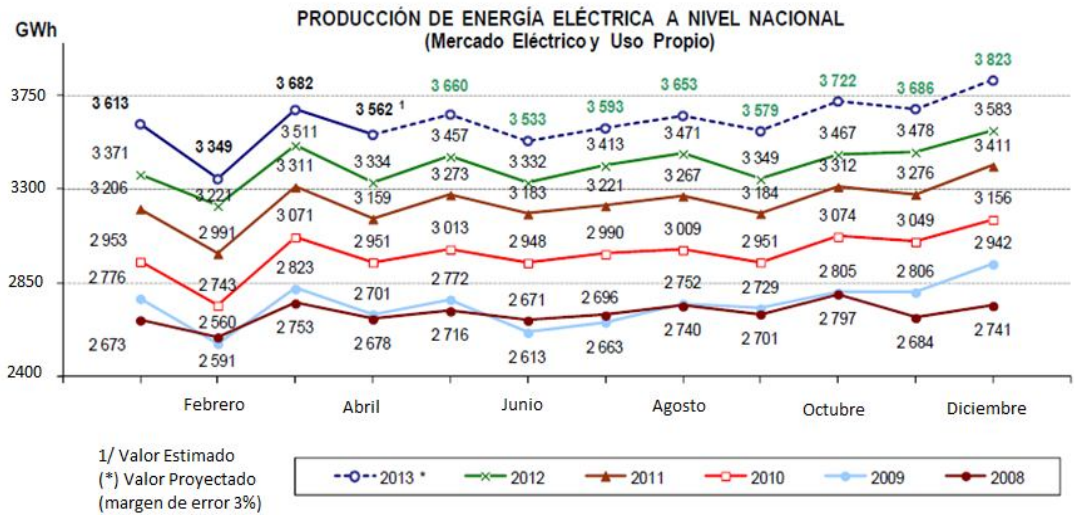


Figura 1.2: Producción histórica anual de energía eléctrica a nivel nacional.

Fuente Documento Promotor 2012 MEM.

1.1.2.El Mercado Eléctrico: De acuerdo a las alternativas para elegir o negociar el precio de electricidad, el mercado eléctrico se puede clasificar en:

- **Mercado Spot:** Donde por defecto o por acuerdo se acepta que los precios de electricidad sean equivalentes a los valores de costo marginal, los cuales varían cada 15 minutos como resultado de la operación de despacho económico del SEIN.
- **Mercado Libre:** Donde por acuerdo de las partes, los precios y condiciones de suministro se negocian libremente.
- **Mercado Regulado:** Donde por acuerdo de las partes se aceptan los precios determinados por el regulador OSINERGMIN, así como las condiciones de suministro establecidas en la norma respectiva.
- **Mercado de Subastas:** Donde por medio de subastas se establecen los precios de compra y venta de electricidad.

1.1.3.Marco Normativo: Desde el año 1992, las actividades y negocios del subsector eléctrico se rigen por la Ley de Concesiones Eléctricas N° 25844, la cual fue perfeccionada y complementada con otras leyes a fin de fomentar la inversión y cubrir determinados aspectos de política energética nacional. Las principales normas que incentivan la inversión en el subsector eléctrico, así como las normas técnicas peruanas relacionadas a la seguridad en operaciones eléctricas y aseguramiento de la calidad de servicio eléctrico al usuario, son:

- **Ley de Concesiones Eléctricas Ley N° 25844:** Principal norma que rige las actividades y negocios del sector eléctrico: generación, transmisión y distribución.
- **Ley N° 27510:** Esquema de subsidios al consumo residencial del servicio eléctrico FOSE.
- **Ley para Asegurar el Desarrollo Eficiente de la Generación, Ley N° 28832:** Ley que perfecciona las reglas establecidas en la Ley de Concesiones Eléctricas.
- **DS N°175-2009/MEM-DM:** Permite la aplicación de un factor de descuento que beneficia a proyectos hidroeléctricos para la oferta económica de licitaciones de suministro.
- **DS N°027-2007-EM y DS N°010-2010-EM:** Que promueve la inversión en transmisión.
- **Ley N° 1058 (Junio de 2008):** Beneficio de la depreciación acelerada, hasta de 20% anual, para la inversión en proyectos hidroeléctricos y otros recursos renovables.
- **Ley N° 28876 (Junio de 2006):** Establece la recuperación anticipada del impuesto general a las ventas de electricidad en empresas que utilizan recursos hidráulicos y energías renovables.
- **Ley N° 1041 (Junio de 2008):** Promueve el uso eficiente del gas natural.

En el Perú los inversionistas tienen el derecho a celebrar contratos de estabilidad jurídica y tributaria, así como de libre disponibilidad de divisas. Además, de ser necesario pueden viabilizar la implementación de proyectos de infraestructura pública o de prestación de servicios públicos, bajo la modalidad de asociación público– privada para agilizar los procesos de promoción a la inversión privada.

1.1.4. FOSE: En agosto del año 2001, mediante Ley N° 27510, se creó el esquema de subsidios al consumo residencial del servicio eléctrico FOSE. Este es un mecanismo que busca beneficiar a aquellos hogares menos favorecidos en sus condiciones socioeconómicas. El esquema busca favorecer específicamente el acceso y permanencia del servicio eléctrico a todos los usuarios residenciales del servicio público de electricidad cuyos consumos mensuales sean menores a 100kWh comprendidos dentro de la opción tarifaria residencial o BT5.

El mecanismo del FOSE es financiado a través de un recargo en la facturación de los cargos tarifarios de potencia, energía y cargo fijo mensual. Este incremento se aplica a los usuarios del servicio público de electricidad de los sistemas interconectados de opción BT5 cuyos consumos mensuales excedan los 100kWh (en el caso de la opción

tarifaria BT5) y al resto de opciones tarifarias, independientemente de su consumo, pero sin incluir a los usuarios del mercado libre. El esquema es administrado por el organismo regulador e incorporado directamente en la facturación del usuario. Para ello se realizan proyecciones de ventas del período trimestral siguiente. A la fecha, más del 60% de hogares con suministro eléctrico son favorecidos por el FOSE. La GART es la encargada del cálculo de los recargos y transferencias del FOSE, mientras que la Gerencia de Fiscalización Eléctrica del OSINERG es la encargada de fiscalizar la correcta aplicación del FOSE. Los descuentos por el FOSE no son de carácter acumulativo. El consumo de 30kWh/mes estará comprendido en el primer rango y el consumo de 100kWh/mes estará comprendido en el segundo rango. La calificación de usuario residencial es efectuada por el concesionario, tomando como base la información presentada por el usuario quien es responsable de su veracidad. El FOSE posee algunas ventajas respecto a esquemas de subsidios utilizados con anterioridad en el sector energético peruano como la reducción general en las tarifas. Este último mecanismo, si bien genera el mismo descuento porcentual entre los usuarios, hace que aquellos de mayor consumo se apropien de la mayor parte de los montos a subsidiar. En este sentido, un mecanismo como el FOSE es conceptualmente más equitativo, ya que tiene un mayor impacto en los usuarios de menor consumo y no beneficia de forma indiscriminada a todos los consumidores. En Lima Metropolitana, el porcentaje de hogares no subsidiados (que subsidia al resto) es de 61.9%, mientras que en áreas urbanas el porcentaje es de 23.2% y, en áreas rurales, de 19%. De acuerdo con [28], la conveniencia de un mecanismo de subsidio puede ser evaluada a partir de aspectos como la existencia de necesidades reales en su motivación, la simplicidad administrativa en su implementación, lo adecuado de su focalización y la relevancia de incentivos que se deriven de su creación. El escenario ideal para un programa de subsidios es aquel en el cual se beneficia únicamente a los hogares pobres. Sin embargo, en [29] se muestra que la focalización completa del subsidio es inviable debido por lo menos a tres factores. El primero consiste en la existencia de elevados costos de administración y recolección de información relevante. En particular, la discusión reciente sobre la evaluación de programas considera que estos deberían ser efectivos en términos de su costo, ya sea maximizando los beneficios para los hogares de menores ingresos a un costo dado, o minimizando el costo de un impacto predeterminado sobre la población objetivo. El segundo factor se relaciona con la respuesta de los hogares y los efectos que un esquema de subsidio podrían tener sobre los incentivos de los mismos. Más específicamente, un individuo puede elegir no participar en el programa debido a los costos que le representa el participar en un proceso de evaluación, llenado de formularios, asistencia a entrevistas, entre otros. De otra parte, los problemas de incentivos se relacionen en gran medida con la existencia de

información incompleta. Si el Estado conociera las preferencias de la población podría diseñar un esquema de subsidios basado en características invariables. Al momento de implementar el programa, sin embargo, sólo se observan determinadas características de la población, que son empleadas para determinar el criterio de elección. Ante la presencia de un programa social, los agentes podrían modificar su comportamiento para incrementar el monto de subsidio que reciben o situarse dentro de la población elegible. Finalmente, un tercer factor se refiere a qué consideraciones de economía política hacen que un programa diseñado idealmente sea inviable en la práctica. En particular, un esquema de subsidios que se concentre únicamente en los hogares de menores ingresos sería apoyado sólo por estos. Sin embargo, estos hogares no podrían tener la suficiente influencia política para contrarrestar los intereses de grupos de mayores ingresos que tendrían que pagar montos superiores [28]. Este problema es especialmente relevante en países en desarrollo, donde hogares no pobres han sido beneficiados extensivamente por programas de subsidios. En este escenario, las autoridades tendrían menores incentivos en diseñar un programa adecuadamente focalizado por temor a perder el apoyo de la población.

1.1.5. Principales Actores del Subsector Eléctrico:

- a. DGE: Dirección General de Electricidad:** Otorga los derechos para la realización de actividades eléctricas. Éstas comprenden la realización de estudios y construcción de infraestructura eléctrica. Además, según sea el caso requiere de la aprobación previa de la DGAAE a los estudios de impacto ambiental. Esta responsabilidad de otorgamiento es compartida con los gobiernos regionales y según los criterios indicados por la norma. También promueve la implementación de proyectos eléctricos, norma las políticas del gobierno central sobre el desarrollo del subsector eléctrico y propone los estándares eléctricos de la norma técnica peruana.
- b. DGER: Dirección General de Electrificación Rural:** Planifica y promueve las obras de electrificación rural de acuerdo al plan del mismo nombre, en coordinación con los gobiernos regionales y locales, y las entidades privadas y estatales especializadas. Cabe señalar que en las zonas de pobreza y extrema pobreza, estas obras son subsidiadas por el Estado.
- c. DGEE: Dirección General de Eficiencia Energética:** Propone la política de eficiencia energética. Esta comprende el uso de las energías renovables y no renovables. En tal sentido, se encarga de formular el Plan Energético Nacional y actualizar el Balance de Energía.

- d. **DGAEE: Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos:** Evalúa y aprueba los estudios ambientales de los proyectos eléctricos de acuerdo a las políticas del Ministerio del Ambiente y los estándares ambientales vigentes en la normatividad nacional.
- e. **OGGS: Oficina General de Gestión Social:** Brinda el apoyo necesario en pro de la relación armoniosa entre las empresas y la población local para lograr el desarrollo sostenible de los proyectos eléctricos.
- f. **PROINVERSION: Agencia de Promoción de la Inversión Privada:** Promueve los proyectos eléctricos y lleva a cabo los procesos de licitación encargados por el MINEM.
- g. **Gobiernos Regionales y Locales:** Al igual que la DGE, otorga derechos eléctricos de acuerdo a su competencia y promueve los proyectos de electricidad de su región en concordancia con los planes nacionales y sus propios planes de desarrollo.
- h. **COES: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional:** Este organismo técnico coordina la operación del SEIN al mínimo costo, preservando la seguridad del sistema y el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos. También, planifica el desarrollo de la transmisión del SEIN y administra el mercado de corto plazo. El COES está conformado por todos los agentes del SEIN, generadores, transmisores, distribuidores y usuarios libres.
- i. **OSINERGMIN: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería:** Determina los precios de referencia de electricidad en base a la política de precios establecida por la Ley de Concesiones Eléctricas (LCE). También supervisa y fiscaliza el cumplimiento de los contratos de concesión eléctrica, y en general las actividades eléctricas de las empresas. En este sentido, OSINERG norma los procedimientos necesarios para sus actividades y ejerce la aplicación de las sanciones respectivas.
- j. **MINAM-OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental MINAM:** Supervisa y fiscaliza los efectos de las actividades eléctricas en el ambiente, según lo establecido en la política ambiental y los estándares vigentes en la normatividad nacional. Asimismo, ejerce la aplicación de las sanciones respectivas
- k. **INDECOPI: Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Propiedad Intelectual:** Evalúa y aprueba las fusiones y adquisiciones entre empresas con la finalidad de resguardar la competencia frente a la influencia de los grupos económicos que poseen participación en las diversas empresas eléctricas del país.
- l. **DEFENSORIA DEL PUEBLO:** Defiende la competencia del mercado eléctrico y los derechos de los consumidores. Emite opinión y sugerencias a nivel persuasivo en protección a los derechos constitucionales de la persona y la comunidad para

asegurar el cumplimiento de los deberes de la administración pública y la prestación de los servicios públicos a la ciudadanía, en este caso del servicio de electricidad.

- m. **Empresas Eléctricas:** Éstas son las empresas de generación, transmisión y distribución eléctrica tanto privadas como estatales. En lo que respecta a las empresas estatales, el Fondo Nacional de Financiamiento del Estado (FONAFE) es la entidad que agrupa a las empresas del Estado con el objeto de normar y dirigir la actividad empresarial del aparato estatal, y que también incluye a ADINELSA, la empresa estatal que administra la infraestructura de electrificación rural subsidiada por el Estado.
- n. **Clientes Finales:** Son los consumidores directos que demandan electricidad para uso residencial o para realizar sus actividades industriales y económicas. Cabe señalar que los grandes consumidores tienen la opción de ser clientes libres (precio a libre negociación). En tal sentido, la Sociedad Nacional de Industrias (SNI) es la institución sin fines de lucro que asocia a las empresas industriales más representativas del país

1.2. Balance Oferta / Demanda

El Balance Oferta / Demanda 2013-2017, presentado por el MEM, estima un crecimiento promedio anual de 8.8% de la demanda del SEIN para el periodo 2013-2017, como se observa en la tabla 1.3.

El margen de reserva es calculado para el periodo de máxima demanda (diciembre), comparando la potencia efectiva con la máxima demanda del SEIN. Para el caso particular de estiaje se consideró la máxima demanda de agosto.

De acuerdo con esta información, en el año 2017 la demanda llegaría a 7,993MW, los márgenes de reserva promedio muestran que el abastecimiento de este crecimiento se tendría asegurado.

Tabla 1.3: Proyección de la demanda del SEIN 2013-2017

| Año | DGE | |
|-------------------------|----------------|------|
| | Potencia MW | % |
| 2012 | 5291 | 6.6% |
| 2013 | 5698 | 7.7% |
| 2014 | 6267 | 10% |
| 2015 | 6875 | 9.7% |
| 2016 | 7526 | 9.5% |
| 2017 | 7993 | 6.2% |
| Promedio (2013-2017) | | 8.8% |

Por su parte, la tabla 1.4 muestra la proyección de la oferta.

Tabla 1.4: Proyección de la Oferta 2013-2017

| Proyectos (MW) | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | |
|---------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|
| CS Tablazo | | | | | | |
| CS – Termochilca | | 100 | | 100 | | |
| CC (TV) – Termochilca | | | | | 100 | |
| CC – Fenix | 520 | | | | | |
| CC – El faro – Shougesa | | | | | 200 | |
| CT – Reserva fria (*) | 761 | 200 | 58 | | | |
| Total CT (MW) | 1281 | 300 | 58 | 100 | 300 | 2039 |
| CH – 1ra.RER (pendientes) | 4 | 39 | | | | |
| CH – 2da.RER | 39 | 122 | | | | |
| CH – Machupicchu II | | | 100 | | | |
| CH – Sta Teresa | | | 98 | | | |
| CH – Quitaracsa | | 112 | | | | |
| CH – Cheves | | | 168 | | | |
| CH – Chaglla | | | | 406 | | |
| CH – Pucará | | | | 150 | | |
| CH – Cerro del aguila | | | | 525 | | |
| CH – Huanza | | 91 | | | | |
| CH – Curibamba | | | | | 188 | |
| Total CH (MW) | 133 | 273 | 366 | 1081 | 188 | 2042 |
| CE Marcona | 32 | | | | | |
| CE Talara | 30 | | | | | |
| CE Cupisnique | 80 | | | | | |
| CE Tres Hermanas | | 90 | | | | |
| Total CE (MW) | 142 | 90 | 0 | 0 | 0 | 232 |
| CS Panamericana solar | | | | | | |
| CS Majes solar | | | | | | |
| CS Repartición solar | | | | | | |
| CS Tacna solar | | | | | | |
| CS Moquegua FV | | 16 | | | | |
| Total CS (MW) | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| CTB La Gringa V | | 2 | | | | |
| Total CTB (MW) | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Total sin eólica y solar | 1414 | 573 | 424 | 1181 | 488 | 4081 |

En el periodo 2013 y 2017 tendríamos un total de 4,080 MW de nueva oferta de generación, de estos 2,040MW corresponden a centrales hidroeléctricas, lográndose un 59% de participación hidroeléctrica en la producción total de energía al año 2017. La tabla 1.5 muestra los resultados del balance de Oferta-Demanda para el período 2013 - 2017. De acuerdo con esta información, los márgenes de reserva oscilarían en el orden del 30% hasta el año 2017, valores que pueden considerarse adecuados para la operación del SEIN.

Tabla 1.5: Balance Oferta – Demanda 2013-2017

| | Base | Balance oferta – demanda 2013 – 2017 | | | | |
|-----------------------------------|------|--------------------------------------|------|------|-------|-------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
| Máx demanda (MW) | 5291 | 5698 | 6267 | 6875 | 7526 | 7993 |
| Pot. Requerida hidro (MW) | | | | | | |
| Pot. Requerida térmico (MW) | | | | | | |
| Pot. Efectiva hidro (MW) | 3136 | 3269 | 3542 | 3908 | 4989 | 5177 |
| Porcentaje hidro en la producción | 54% | 52% | 52% | 52% | 60% | 59% |
| Pot. Efectiva total (MW) | 6968 | 8335 | 8872 | 9210 | 10319 | 10792 |
| Reserva (diciembre) | 25% | 39% | 35% | 27% | 30% | 28% |
| Reserva (diciembre) – MW | 1307 | 2238 | 2166 | 1854 | 2266 | 2240 |
| Reserva en estiaje (agosto) | 15% | 31% | 26% | 18% | 19% | 18% |
| Reserva en estiaje (agosto) – MW | 761 | 1675 | 1560 | 1186 | 1386 | 1332 |

Asimismo, en estiaje los márgenes de reserva se encuentran alrededor del 20% hasta el año 2017. Estos cálculos consideraron:

- Retiro de operación de 140MW de unidades térmicas obsoletas en el periodo 2013 al 2017.
- Incremento de la actual capacidad disponible de transporte del gasoducto Camisea para generación eléctrica (390MMPCD) en 80MMPCD (57.5MMPCD para Central Termoeléctrica Fénix y 22.5MMPCD para Central Termoeléctrica Santo Domingo de Olleros).
- Exclusión de la inyección de la central de emergencia Central Termoeléctrica de Emergencia Piura (80 MW).
- Exclusión de centrales eólicas y solares.
- Reforzamientos y ampliaciones del sistema de transmisión según cronogramas contractuales.
- Reducción de la oferta de generación debido a indisponibilidad por mantenimiento.

De acuerdo con esta publicación, las contingencias más severas para el SEIN, en orden de relevancia son:

- Indisponibilidad del gasoducto Camisea: Ocasionaría, a la fecha, una pérdida neta de oferta de generación de 2,360MW, sin considerar unidades duales que operarían con Diesel ante una contingencia.
- Salida del Complejo Mantaro (8,80MW).
- Alta concentración de sólidos en suspensión, que implicaría una reducción de la oferta hidroeléctrica de aproximadamente 500MW.

Esta información contiene un enfoque optimista de crecimiento moderado de la demanda, una continuidad ininterrumpida en la ejecución de los proyectos de generación y transmisión; y sobre todo, una preponderancia de la generación hidroeléctrica, que aunque económica, muchas veces resulta impredecible por las condiciones climáticas a las que está sujeta.

Capítulo II

DSM y Smart Grids

En este capítulo se describen las principales programas de gestión de la demanda y su proyección óptima e integral a mediano y largo plazo: Las Redes Inteligentes o Smart Grids.

2.1. DSM

Tradicionalmente, las empresas del sector eléctrico han buscado principalmente satisfacer, de la forma más rentable posible, la demanda de energía eléctrica de sus clientes. En el diseño de mercados eléctricos, todo el énfasis ha sido normalmente puesto en el lado de la generación; sin embargo, la búsqueda constante hacia una mayor rentabilidad, manteniendo a su vez niveles mínimos de confiabilidad, seguridad y calidad de suministro, conducen inexorablemente a dirigir esfuerzos a la influencia del consumo del usuario final, esto es, la demanda. Y es que la industria eléctrica ha intentado toda forma de conservación y optimización, desde exhortación hasta subsidio, excepto la única utilizada en todos los demás mercados: el precio. La conservación por precios significa que el consumidor reduce su demanda cuando el precio es alto, justo cuando el sistema lo necesita más. La respuesta al precio es conservación en el modo más práctico.

La demanda de la electricidad es altamente concentrada durante el 5% del tiempo [30]. Si se encontrara una forma de reducir esos picos de demanda, se eliminará la necesidad de capacidad de generación instalada que sería utilizada relativamente pocas horas al año. Esta capacidad de generación es normalmente de turbinas de combustión, normalmente cara, añadiendo además que estas se encontrarían inoperativas la mayor parte del tiempo.

Y es que precisamente, la falta de respuesta de los clientes es la razón para las preocupaciones sobre la confiabilidad del sistema. Una adecuada atención a la respuesta de la demanda eliminaría entonces la necesidad de capacidad adicional, requerimientos de capacidad instalada y otros medios de regulación.

Los esfuerzos de las empresas eléctricas, naturalmente, han ido evolucionando de acuerdo a los cambios socio-económicos de cada país así como a los avances tecnológicos del sector y de las comunicaciones. Por ejemplo, a comienzos del siglo

pasado, se promocionó el consumo eléctrico diurno ya que la densidad de demanda era alta en horas nocturnas, principalmente debido a la iluminación. Con el tiempo, el consumo aumentó y los picos de demanda comenzaron a desplazarse también a horarios diurnos, planteando la disgregación de la misma durante el día. Con esto, se dio inicio a la posibilidad de establecer desfases temporales de activación de las cargas. Ya a mediados de siglo, comenzó a aplicarse la tarificación en base a costos marginales sobre clientes de media y alta tensión, extendiéndose en 1965 a clientes de baja tensión, dándose así el inicio de los periodos tarifarios. Esta política se relacionaba directamente con la posibilidad del desplazamiento de activación, hecho que se hizo muy popular en las décadas 70 y 80 en Estados Unidos, como respuesta a la incertidumbre sobre el crecimiento de la demanda resultado de la crisis del petróleo y la época de recesión de entonces. Bajo estas condiciones, las acciones encaminadas hacia la modificación de las tendencias de los consumidores se convirtieron en una vía posible de mejoramiento del uso de los recursos y una disminución de la dependencia de fuentes energéticas extranjeras.

Es así que por estos años emergen los términos que identificaban las acciones dirigidas al control de cargas en la demanda. Así, el concepto de control de cargas o *Load Management*, fue definido como el control deliberado de carga por parte de los clientes, a fin de desplazar en tiempo y cantidad el uso energético. Al respecto, fue importante diferenciar los conceptos Gestión de Cargas de la Empresa y Gestión de Cargas del Cliente, en función de quién realiza el control de las cargas. Asimismo, se diferencian los términos de Control Directo de Cargas (por parte de la empresa) y Tarifas de Corte. Finalmente, se adapta el término de Gestión de la Demanda (DSM por sus siglas en inglés), definido como la planificación e implementación de actividades de la empresa eléctrica dirigidas a influir los patrones de consumo de los clientes, sin alterar su *comfort* e incluso, mejorando su satisfacción motivando una participación más activa de los mismos en el sistema.

La idea fundamental detrás de la respuesta de la demanda es proveer señales de precio o medios precisos a los clientes para que estos puedan tomar una decisión o que acepten acciones previamente acordadas en un contrato. El ahorro conseguido por las respuestas dependerá de dos cosas: primero, cuanto puede reducirse el pico de carga por los clientes, y segundo, cuanta inversión en generación y transmisión puede ser eliminada con esta reducción de carga.

2.1.1. Beneficios del DSM: Los programas DSM representan una solución ganar-ganar para todos sus actores, beneficiándolos directa o indirectamente con diferentes tipos de beneficios que proveen (económicos, intangibles, ambientales, etc.) incluso cuando no

sea posible cuantificarlos todos [30] [15]. Algunos de los beneficios de los programas DSM son:

- Reducción del margen de generación: Normalmente la capacidad instalada total de generación del sistema debe ser mucho mayor que la máxima demanda para asegurar la seguridad del suministro y enfrentar las incertidumbres o contingencias desde el lado de la generación o variaciones desde el lado de la demanda, por factores climáticos, por ejemplo. En lugar de cubrir este problema con generación instalada utilizada con poca frecuencia, sería posible identificar a los consumidores finales que estarían dispuestos (por un incentivo económico) a reducir su consumo de manera relativamente infrecuente; dado además que la cantidad de reducción de carga requerida no es masiva en comparación con el tamaño del sistema. Es importante para ello, obtener la información de la frecuencia, duración e intensidad de las principales contingencias en cada sistema.

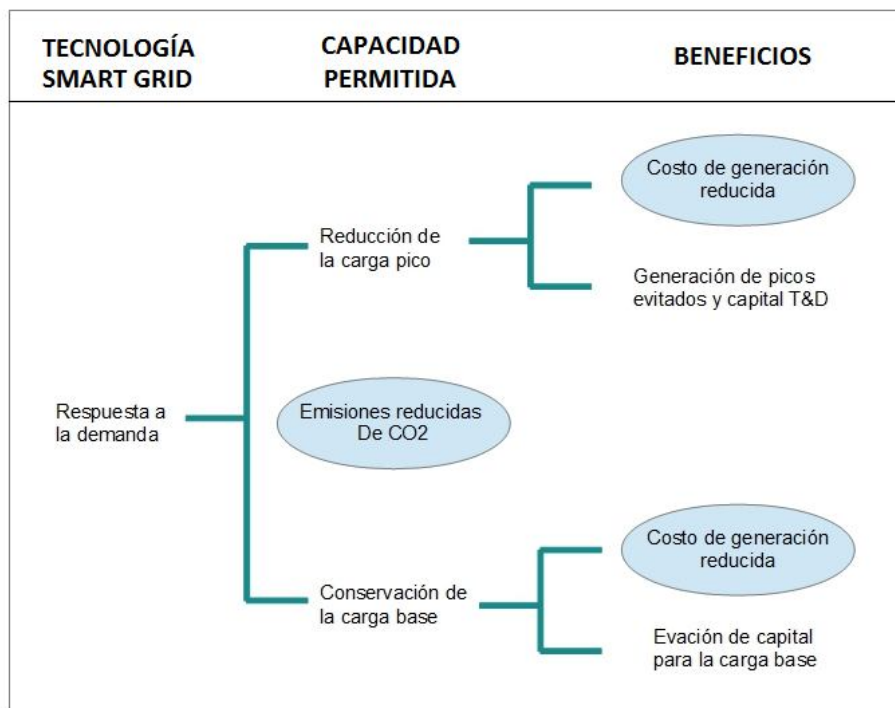


Figura 2.1: Beneficios del DSM. Fuente: “*Demand Side Management: Benefits and Challenges*”.

- Posibilidad de utilización de energía renovable: El DSM (inmerso en una Red Inteligente) brinda un medio de aprovechamiento óptimo de la energía renovable generada pues provee una forma alternativa de reserva [15].
- Siendo un sistema económicamente eficiente, brinda ahorros financieros

sustanciales [31] reduciendo de la necesidad de capacidad instalada para la generación de reserva, con un ahorro incurrido que podría estimarse basándose en los costos requeridos para la generación termoeléctrica.

- Ahorro de la energía no utilizada.
- Disminución de los requerimientos en la capacidad de transmisión y distribución.
- Generación de mercados energéticos más competitivos.
- Reducción de la volatilidad de los precios eléctricos.
- Provisión de seguridad contra eventos extremos no previstos en el planeamiento de los escenarios de operación.
- Reducción de las emisiones de CO₂ en los momentos de consumo pico.
- Incremento de la confiabilidad y mejora operativa del sistema.
- Incremento en el *confort* y bienestar de los usuarios finales, por una mejor calidad de servicio ofrecido.

La preponderancia de los beneficios depende de la coyuntura nacional donde el DSM sea aplicado, además del tipo de programa establecido y el marco legal-político soporte para la implementación.

Los programas DSM, por tanto, tendrían componente técnico y económico. El primero relacionado con la estructura tecnológica necesaria para la implementación y su repercusión sobre la curva de la demanda; mientras que el segundo se relaciona con la asignación del recurso energético a utilizarse; ya que un kWh adicional puede ser obtenido incrementando la producción (generación) o reduciendo la demanda. Es por ello que el DSM depende de la combinación del uso de equipamiento de alta tecnología y el uso eficiente de la electricidad a través de buenas prácticas operativas [32]; siendo una tarea de las empresas de sustitución.

2.1.2. Objetivos del DSM: El objetivo omnipresente del DSM es la modificación de la curva de la demanda, aunque no todas las acciones conllevan al mismo efecto ya que, en función del programa, los objetivos varían. Son seis las modificaciones objetivo de curva de carga comúnmente asociadas con DSM. La figura 2.2 muestra la relación entre objetivo y acciones a tomarse. En términos generales puede clasificarse los objetivos del DSM en tres grandes grupos [2].

- Programas de Eficiencia Energética: Dirigidos a reducir la energía consumida por sistemas en particular sin afectar dramáticamente la calidad de servicio prestado. Estos programas pueden ser aplicados tanto a los consumidores finales como a los fabricantes, utilizando para ellos diversos tipos de incentivos. El consumidor, por

ejemplo, se vería inducido a la sustitución de equipos por otros de menor consumo como sistemas de alumbrado ahorrador. Por su lado, los fabricantes podrán incurrir en llevar a cabo actividades de I + D (Investigación y Desarrollo) para obtener productos de mayor eficiencia y en desarrollar procesos más eficientes de producción. La curva de ahorro energético cae dentro de esta clasificación.

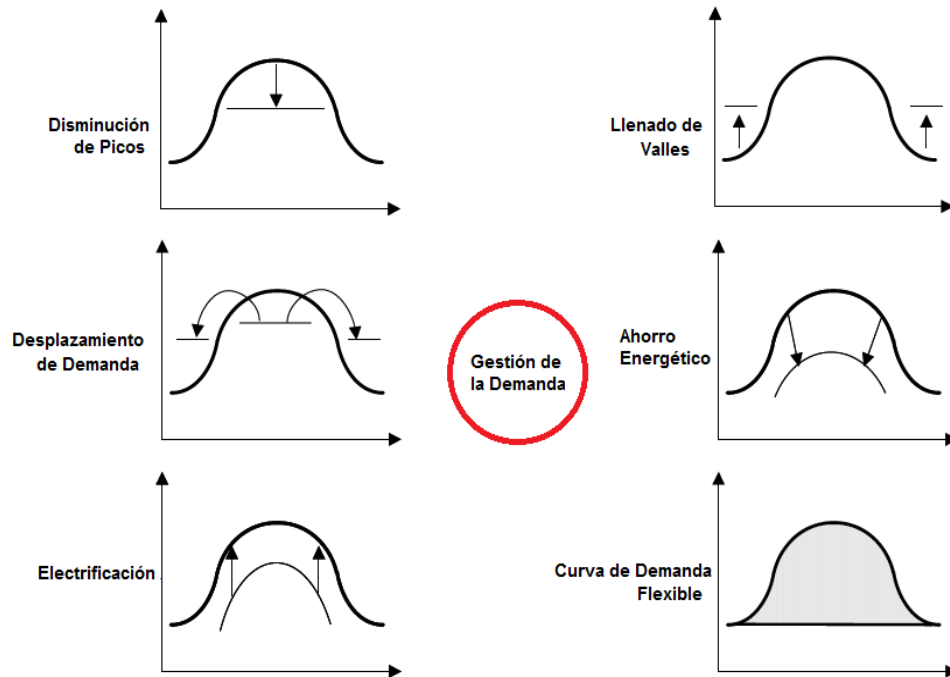


Figura 2.2: Objetivos DSM. Fuente: “*Primer on Demand-Side Management*”.

- Desplazamiento de Curva de Carga: Aquí la empresa eléctrica puede interrumpir directamente el suministro de energía a equipos en particular, basados en las especificaciones contractuales con el cliente, en la que además se especifica el tiempo máximo de desconexión, el número máximo de desconexiones o inhibiciones en un periodo determinado de tiempo contractual. Es precisamente este tipo de programas a los que apunta el desarrollo de esta tesis, e históricamente son los que mayormente se aplican en clientes residenciales y comerciales. Las cargas que son controladas normalmente son de alta demanda energética y entre ellas se encuentran los sistemas de aire acondicionado, las bombas, las duchas eléctricas, las cocinas eléctricas, las lavadoras, entre otros. Estos además no inciden directamente o tan drásticamente en la comodidad del usuario como lo haría la iluminación y los equipos audiovisuales. A este grupo

también pertenecen los programas de acciones voluntarias, en función del precio, por parte del cliente. Existen además programas que combinan las opciones de respuesta con controles predispuestos, siempre en el marco delimitante contractual. Las curvas de disminución de picos, llenado de valles y desplazamiento de demanda forman parte de este grupo de programas.

- **Electrificación:** Estos programas envuelven acciones de abastecimiento continuo para edificaciones, y está asociado normalmente con programas de retención de clientes desde la perspectiva del distribuidor. Envuelve también el desarrollo de nuevos mercados y clientes. Dentro de esta clasificación tenemos la curva de crecimiento estratégico y la curva de demanda flexible.

2.1.3. Programas DSM: Los programas DSM recaen en dos categorías [2]:

1. Programas de corte de carga centralizado: Establecen un pago hacia el cliente a fin de que este reduzca su consumo eléctrico en los momentos críticos. Incluye clientes comerciales, industriales y residenciales.
2. Programas de precio dinámico: Brindan un incentivo de reducción de facturación al cliente, a fin de que este reduzca su consumo pico.

Ambos tipos de programas le brindan al cliente incentivos para reducir, de una u otra forma, sus consumos durante momentos críticos y serán vistos en detalle en el capítulo 5.

2.1.4. Barreras y Recomendaciones para el DSM: Durante las tres décadas pasadas, los programas de DSM han tenido un impacto significativo en el ahorro energético y en la suficiencia para el abastecimiento en los momentos pico de demanda en los Estados Unidos. Sin embargo, hay aún mucho potencial que desarrollar y diversos estudios se han llevado a cabo a fin de poder estimarlo [3]. El potencial sólo podrá ser desarrollado si las barreras que se mantienen en el camino son superadas, especialmente en el sector residencial. Existe información abundante respecto a estas barreras y la importancia de las políticas apropiadas para eliminarlas.

Una de las principales barreras, sobre todo en países en desarrollo, es el escaso conocimiento de los programas DSM y de eficiencia energética; y por ello el marketing se hace necesario para promoverlos. Las organizaciones que llevan a cabo esta promoción deberían [36].

- Contar con conocimiento y claro entendimiento de los sistemas y oportunidades del DSM.
- Demostrar la competencia y comprensión de su objetivo principal
- Considerar la precisión de sus supuestos.

- Ser conscientes de las restricciones en producción y seguridad de las compañías y procesos involucrados.

Otra barrera significativa consiste en que los ahorros reales, algunas veces, son menores que los costos incurridos para lograrlos, creando un problema de credibilidad en los nuevos programas por parte de las empresas distribuidoras, con un enfoque indudablemente comercial. Este problema puede ser agravado puesto que algunas veces se pagan incentivos para mejorar el uso de la energía a los nuevos afiliados aun cuando estos hubiesen tomado las mismas acciones estando fuera de los programas. Una de las lecciones claves aprendidas en las tres décadas de experiencias pragmáticas es que las empresas no implementarán programas DSM sin un seguro de recuperación de la inversión, la disponibilidad de mecanismos de beneficios ante la decaída de las ventas que estos programas implican y sin incentivos financieros para los accionistas. En muchas situaciones, los estándares para electrodomésticos y edificaciones pueden ser el camino más económico para alcanzar ganancias a largo plazo. Por último, mientras se diseñan programas DSM, es importante tomar una perspectiva completa del cliente. Hay ejemplos diversos de programas de DSM que fallaron porque se enfocaron en mediciones individuales y fallaron en entender la perspectiva del cliente, sin darse cuenta que las personas en diferentes partes del negocio no coordinaban entre ellas, haciendo imposible la integración eficiente.

Muchos autores han enfatizado la distinción entre fallas de mercados y barreras de mercados. Interviniendo para la corrección de las fallas de mercados mejora tanto la eficiencia energética como la eficiencia económica, mientras que solucionar las barreras del mercado mejora la eficiencia energética pero a un costo para los clientes [32]. Normalmente, y de manera más realista, estas barreras pueden clasificarse como organizacionales y conductuales; siendo estas últimas, parte crucial del proceso de toma de decisiones.

La tabla 2.1 muestra las barreras principales del DSM que afectan al sector residencial resultando en inversiones poco óptimas. La tabla también incluye las posibles acciones a tomarse para reducir estas barreras.

Tabla 2.1: Barreras para el DSM en el sector residencial

| Categoría | Barreras | Descripción | Ejemplos / posibles causas | Solución Genérica |
|---------------------|---|--|--|---|
| Fallas de Mercado | Información imperfecta | Cuando la información es cara, dudosa y difícil de obtener. | Falta de o incompletos precios reales y/o información de consumos. | Incremento y/o mejora en la calidad de información. |
| | Externalidad Negativa / Ausencia de mercados para EE(*) | Cuando hay una falta de precios efectivos o cuando la EE es un atributo del producto sobre el cual no tiene elección. | Costos de emisión de CO2 no incluidas en precios de combustibles, precio por menor de electricidad no refleja el costo en tiempo real de producción. | Internalización de costos no contabilizados. |
| | División de incentivos | Cuando un agente tiene la autoridad para actuar a favor del consumidor, pero no refleja los mejores intereses de este. | Problemas de agentes principales; intermediarios en la compra de tecnologías de energía. | Incentivos realineados. |
| Barrera de mercado | Acceso a capital | Cuando el costo de la inversión es grande. | Altos costos iniciales para equipos más eficientes; falta de acceso a financiamiento. | Reducir el porcentaje de interés y costos de oportunidad. |
| | Riesgo | Cuando los riesgos (real o percibido) no son capturados directamente en un flujo financiero | Tiempo de recuperación de inversión inciertos en relación a precio de energía futura. | Reducir la real o percibida incerteza o riesgo. |
| | Costos de transacción / costos escondidos | Cuando costo (real o percibido) no son capturados directamente en un flujo financiero | Costos incurridos en encontrar información apropiadas de equipos e incompatibilidad. | Reducir la real o percibida incerteza o riesgo. |
| Economía Conductual | Racionalidad limitada | Cuando los individuos no toman decisiones en forma óptima y obvian oportunidades de EE. | Restricciones en tiempo, recursos y habilidad en procesar información aún está disponible. | Sensibilizar y disponibilizar información. |
| | Baja prioridad / problemas de interés de energía | Cuando las oportunidades EE se pierden como consecuencia de falta de conciencia e interés. | Costo de energía son un pequeño porcentaje del costo total de la casa. | Sensibilizar y disponibilizar información. |
| Otros | Política y barreras estructurales | Cuando características estructurales de la política económica, sistema energético hacen difíciles inversiones EE. | Diferencias en grado de liberación del mercado eléctrico; diferencias en nivel económico en regiones; falta de habilidades técnicas y expertos. | Mejorar las instituciones; cooperación en el fortalecimiento de la capacidad. |

EE: Eficiencia Energética.

Incluso con una revisión superficial de la tabla, puede observarse lo complejas e interrelacionadas que son las barreras y los tipos de respuestas. Las barreras de mercado están entre las más importantes del sector residencial. En contraste, las barreras conductuales se encuentran quizás entre las más difíciles de contrarrestar ya que cambiar los comportamientos y estilos de vida es complicado.

Una de las primeras condiciones importantes en la evaluación de la implementación de este tipo de sistemas, se hace evidente ante la influencia de las mismas sobre los ingresos de las compañías, dado que estos aumentan al hacerlo sus ventas; mientras que los DSM reducen las mismas produciendo la reducción de los beneficios y una consecuente reacción contra la implementación de estos programas. Debe pues, hacerse presente la intervención de medidas legislativas que incentiven la implementación así como recompensas económicas sobre el ahorro logrado; en un esfuerzo de plantear una solución ganar-ganar para todos los componentes.

En [15] se enfatiza que pese a la implementación tecnológica acelerada actual, requerida para el desarrollo del DSM, este se mantiene lento. Las razones identificadas en esta literatura se resumen como:

- Falta de infraestructura: Las mediciones avanzadas, las comunicaciones, los métodos de control y las tecnologías de información usualmente no han sido explotadas masivamente en los sistemas eléctricos. Normalmente, la implementación de sistemas DSM requieren el uso de sensores y dispositivos avanzados de control con funciones de seguimiento y medición de energía sofisticados. Por ello, se requiere un análisis completo de los costos y beneficios de la infraestructura requerida, considerando sus beneficios laterales, como la optimización de procesos de medición, monitoreo, control y facturación remota.
- Falta de entendimiento de los beneficios del DSM: Recae generalmente en la falta de metodologías para la cuantificación de los costos y beneficios; generados por la falta de claridad de los modelos de negocio incluyendo DSM y para cuales resultaría conveniente. Por ejemplo, en segmentos del sistema que necesiten márgenes de reserva,
- Percepción de poca competitividad: Usualmente las soluciones DSM no son competitivas al ser comparadas con soluciones tradicionales. Para contrarrestar este efecto, es necesario comprender el desempeño técnico, económico y ambiental de los esquemas DSM futuros, tomando en cuenta los beneficios intangibles, indirectos y de mediano y largo plazo.
- Incremento en la complejidad de los sistemas por los DSM: Al incluir un sistema DSM dentro de un sistema eléctrico funcional, se incluyen también factores de complejidad adicionales. Sin embargo, dada la flexibilidad que los sistemas DSM

ofrecen junto con la reducción de costos continua derivada de la tecnología implementada, se espera que su inclusión sea cada vez menos compleja.

- Estructura inapropiada del mercado y falta de incentivos: El desarrollo de un modelo de negocio en el que se beneficien equitativamente las partes y sectores de la industria, es un desafío importante para el desarrollo del DSM. Conviene la atención en experiencias previas para adaptar los métodos con resultados exitosos.

En un escenario normal, los compradores residenciales de electricidad no tienen incentivos para responder porque no conocen el precio en tiempo real ni los movimientos de corto plazo del mercado. La electricidad pico y la electricidad fuera de pico son productos diferentes con diferentes precios, pudiendo estos variar en un factor de 10 entre los momentos de pico y los momentos no pico. Los primeros intentos por diferenciar estos productos fue el establecimiento de tarifas diferenciadas en 2 ó 3 periodos del día y algunas empresas de distribución optaron por trabajar con precios en tiempo real. No obstante, el trabajo con precios en tiempo real tiene ciertas consideraciones a ser tomadas en cuenta. Primero, no existe un precio en tiempo real determinado por los mercados (la empresa de distribución decidiría el precio en cada hora, y alguien podría imponer precios no reales o injustos). Segundo, el precio en tiempo real, cuando hay un mercado, es muy volátil y muchas personas prefieren los precios fijos. Tercero, los medidores horarios pueden ser muy caros. Y cuarto, el sistema requeriría de un componente regulador que debería ser incluido en los costos, haciéndolos aún mayores.

Las barreras para el DSM están estrechamente relacionadas con las barreras de falla de mercado, con información particular deficiente y con la falta o ineficiencia del sistema de incentivos. De hecho, las asimetrías de la información y la inelasticidad de la demanda, se deben principalmente a la falta de precios que reflejen realmente los costos. Se requiere, por tanto, una participación gubernamental activa para la legislación correspondiente y la elaboración de campañas de concientización e información.

2.1.4.1. Políticas para el incentivo del DSM: Las barreras listadas en la tabla muestran algunas de las acciones para superarlas. Las políticas deberían motivar la eficiencia económica y energética [32].

El tiempo es particularmente importante para la electricidad, dado que los precios de generación fluctúan de manera significativa a lo largo del día. Como se mencionó, en momentos de demanda pico, los costos de producción de electricidad son significativamente mayores porque los generadores de pico deben operar para satisfacer esta demanda. Normalmente estos generadores son termoeléctricos, de

operación más cara que los hidroeléctricos.

La mayoría de los clientes no están expuestos a estos cambios por lo que tienen poco incentivo de cambiar su consumo eléctrico en las horas más caras de producción. Las decisiones de inversiones futuras de plantas generadoras se ven directamente afectadas por esta falta de respuesta de la demanda y su habilidad de encajar la oferta con la demanda de manera confiable. Los objetivos del DSM incluyen actividades para la eficiencia energética, el desplazamiento de la curva de la carga y la electrificación [2] e implican cambios en la estructura de la industria eléctrica. El DSM puede ser administrado por las empresas de distribución, agencias estatales u organizaciones sin fines de lucro.

La literatura recopilada internacionalmente identifica 18 grupos de políticas relevantes con enfoque en el sector residencial, clasificadas en seis categorías generales [32]. Algunas políticas están estrechamente relacionadas entre sí y otras podrían compartir el rango de acción; sin embargo, todas las categorías son importantes.

El Simposio de Programas Ambientales de las Naciones Unidas – Iniciativa Edificios y Clima, UNEP-SBCI por sus siglas en inglés (*Symposium of the UN Environment Programme's Sustainable Buildings and Climate Initiative*) propuso criterios de evaluación donde las políticas son evaluadas de acuerdo a sus fortalezas, debilidades y efectividad (alcance de los objetivos), su costo-beneficio y los factores que impiden o promueven su éxito. Las seis categorías pueden resumirse como:

- a. Políticas Estructurales: Son un conjunto general y más abstracto de principios y objetivos a largo plazo que guían el desarrollo de políticas base específicas y que pueden ayudar a la elaboración de estrategias con un acercamiento más general y holístico.
- b. Políticas de Control Regulatorias: Incluyen leyes y regulaciones de implementación (por ejemplo requerimientos cualitativos / cuantitativos) que requieren los diseños de ciertos dispositivos, sistemas o prácticas para incrementar la eficiencia energética.
- c. Políticas Económicas Basadas en el Mercado: Toman en cuenta los contratos de desempeño energético EPC, por sus siglas en inglés (*Energy Performance Contracting*) y las compañías de servicio eléctrico; quienes garantizan ciertos ahorros energéticos para un ubicación y periodos específicos. Las ganancias se obtienen de la reducción de costos de energía lograda.

d. Políticas Financiera Basada en Incentivos: Están orientada a corregir el precio de la energía a través de impuestos o, en contraparte, con la implementación de incentivos. Estas políticas están direccionados a eliminar las barreras económicas de implementación del DSM.

e. Acuerdos Voluntarios y Alianzas: Estas políticas buscan persuadir el comportamiento energético de los consumidores finales.

De acuerdo con [32], los retos para el DSM recaen más en el correcto diseño de políticas que en el incremento de recursos financieros. Una estrategia exitosa es la combinación de regulaciones, incentivos y campañas de información, evidenciado en [33]. Una estrategia integrada para la demanda se basa en reconocer que ninguna política aislada puede superar las barreras mencionada y que una política puede direccionarse a varias barreras simultáneamente. Esto requiere una “estrategia integrada de políticas”, basadas en los diversos aspectos culturales y conceptuales, así como en las metodologías, de forma que el enfoque de sus fortalezas y debilidades no se abordado de manera aislada sino con un análisis más comprehensivo de la interacción entre las mismas.

Los factores de éxitos de una estrategia energética bien diseñada incluyen la existencia de objetivos y mandatos claros, la participación de los accionistas, la habilidad de combinar la flexibilidad y sostenibilidad y la habilidad de adaptar e integrar las políticas de mercado.

La flexibilidad es requerida ya que las políticas interactúan entre ellas, y su impacto evoluciona en el tiempo.

La sostenibilidad crea certeza y permite que los programas sean soportados económicamente en las estrategias de integración en la transformación de mercado. Los paquetes más exitosos son claros, efectivos y sostenibles manteniéndose flexibles.

Las combinaciones particularmente efectivas envuelven actores públicos y privados. Las medidas de campo de acceso difícil son usualmente tarea de las empresas privadas, mientras que la acción del gobierno recae en incentivar las inversiones de los primeros. Las experiencias internacionales ofrecen alguna información. Por ejemplo, en Estados Unidos, Dinamarca y Japón, que integraron paquetes de políticas DSM muestran una mejora general de su eficiencia energética [33]. Un aspecto importante de estas experiencias es que ellos no duplican las medidas de eficiencia energética para el sector residencial, sino que las repotencian. El Reino Unido, por su parte, cuenta con paquetes de políticas

integradas aún con oportunidades de mejora especialmente en aclaración de términos, información y coordinación.

Sea cual sea la política impuesta, normalmente estará limitada por las características de los ambientes (factores físicos) por lo que este representa un buen inicio para el enfoque estatal.

La transformación del mercado ofrece garantía de éxitos para la implementación del DSM y debería ser uno de los objetivos primordiales de las políticas gubernamentales. No obstante, ha de tomarse en cuenta que las restricciones y los escenarios para el modelamiento del comportamiento residencial y la respuesta ante las estrategias DSM, generan grandes diferencias en los estudios de evaluación entre diferentes países y, dentro de ellos, entre diferentes empresas. Las incertidumbres deberán ser también limitadas dentro del marco que cada realidad ofrezca con información histórica y guiada, con sumo cuidado, con las experiencias internacionales [35].

2.1.5. Experiencias Internacionales: A finales de los 70s y comienzos de los 80s, se dieron los primeros experimentos en variación de precios eléctricos por la *Federal Energy Administration* (FEA) [36]. Estos experimentos se enfocaron en medir la respuesta del consumidor a tarifaciones estacionales de días. La información fue analizada por *Christensen Associates for the Electric Power Research Institute*. Los resultados fueron concluyentes: los clientes respondieron al incremento de precios durante los periodos pico reduciendo su uso y desplazándolo hacia los periodos más económicos. Los resultados fueron consistentes a lo largo del país bajo las mismas condiciones climáticas y la tenencia de electrodomésticos fueron constantes. La respuesta de los consumidores fue mayor en climas cálidos. La elasticidad de sustitución para el consumidor promedio fue de 0.14, en rangos entre 0.07 y 0.21.

No obstante, las tarifas variables en el tiempo no fueron aceptadas totalmente a lo largo del país, por tres razones. Primero, el alto costo para la medición en tiempo real; segundo, los periodos de pico ofrecidos en el diseño de la tarifación fueron muy altos para la aceptación de los consumidores. Y tercero, no se publicitaron los programas efectivamente. La mayoría de los clientes ni siquiera sabían que estas tasas existían.

El proyecto DSM más exitoso fue el utilizado en la empresa *Florida Power and Light* (FP&L) que usó la demanda de aire acondicionado para el control de la frecuencia. Cuando el operador le negó a FP&L un incremento de tarifa basado en la subida de precio del petróleo, FP&L cubrió el despacho económico a la máxima tasa permitida y luego utilizó la demanda de los aire acondicionados para responder a los cambios de frecuencia, experiencia que se convirtió en un precedente a beneficio del DSM. Entre los

requerimientos principales y más cruciales para la implementación de estos sistemas, se encuentra la transmisión de datos en tiempo real. A comienzos de este siglo, los avances tecnológicos en las comunicaciones y transmisión de datos han ido aumentando de manera exponencial, haciéndolos cada vez más asequibles, sobre todo si forman parte de un mercado de escala. Ya en países como Irlanda y el Reino Unido, se encuentran programas pilotos de implementación centralizada sobre redes IP. Por su parte, en Nueva Zelanda, por ejemplo, las empresas, *Wel Networks* (www.wel.co.nz), *Powershop* (www.powershop.co.nz) y *Mercury* (www.mercury.co.nz), han diseñado e implementado diversas plataformas con éxito relativo en función del tipo de cliente al que se dirigen; complementados con medidores “inteligentes”, siendo el 2013 el año límite para la certificación de los mismos con miras a la estandarización (como resultado de los constantes problemas de incompatibilidad de tecnologías).

Los pilotos instalados cuentan con relés para el control de rizado, tomacorrientes “inteligentes” (con respuesta ante petición) pre-programados en función del tipo de electrodoméstico al cual se encuentran conectados. Algunos sistemas cuentan con plataforma Web para los clientes con tarifas diferenciadas (por ejemplo para los fines de semana o estaciones) que es utilizado como un medidor convencional de lectura mensual. Un dispositivo de optimización para incentivar y facilitar la respuesta del consumidor final, es el propuesto por la empresa Mercury, conocido como *Timewise* y mostrado en la figura 2.3, con un indicador amigable, basado en colores (verde, ámbar y rojo) para estimular el uso de energía en momentos de precios bajos (verde) e incentivar la desconexión o postergación en los momentos de altos precios (rojo).

La base instalada con el soporte requerido de comunicaciones es además aprovechada en el proceso de facturación y regulación remota.

Y es que precisamente el factor humano es una clave para el éxito de la implementación de estas iniciativas, ya que las mismas inciden, en función de la contingencia, de manera drástica o imperceptible en la disponibilidad de uso de los electrodomésticos y artefactos eléctricos en general del hogar, esto es, en la comodidad del usuario final. Por ello, diversos estudios se llevan a cabo intentando determinar el punto sostenible y viable económicamente, en la implementación de este tipo de sistemas sobre el *confort* del usuario final. Campañas graduales de concientización, legislaciones y acciones ‘obligatorios’ o ‘incentivados’ son los primeros pasos para la incorporación exitosa de este tipo de sistemas.

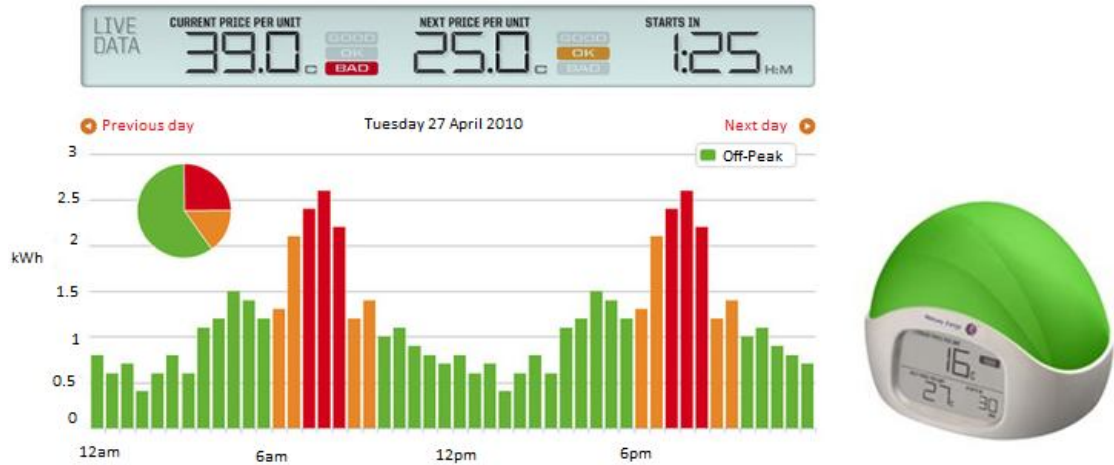


Figura 2.3: Timewise y reporte para usuario final con consumos por hora

Fuente: <http://www.mercury.co.nz>

Experiencias particulares de tipos de programas DSM son listadas en el capítulo 4.

2.1.6. Implicancias para la Implementación de DSM en Países en Desarrollo.

Una de las experiencias más interesantes en la implementación de políticas energéticas se dio en Sudáfrica, ya que las empresas de distribución son estatales e insolventes. Por ejemplo, la empresa de distribución principal de la India y Pakistán sólo cubre el 70% de sus costos, mientras que las pérdidas por robos oscilan entre el 20 y 40% [3]. Existe una necesidad fuerte de inversión en infraestructura en economías emergentes para la aplicación de estos sistemas; no obstante el capital es escaso y por lo general se requiere de dinero extranjero. Se estima, por ejemplo, que la India necesitará alrededor de 100GW de capacidad nueva en los próximos años, con un capital requerido de \$140 billones. Es importante, por tanto, tomar en cuenta la implementación gradual y sostenible de los programas y compararlos con el costo incurrido, sobre todo a largo plazo considerando el crecimiento sostenido de la demanda.

En cuanto al Perú, en Agosto del año 2001, mediante Ley N° 27510, se creó el esquema de subsidios al consumo residencial del servicio eléctrico FOSE como medida inicial para la diferenciación de tarifas en función del gasto mensual de los consumidores residenciales. Este esquema establece una reducción en la tarifa de electricidad para los hogares con consumos mensuales menores a 100kWh, y beneficia a consumidores no necesariamente considerados dentro del sector pobre de la población. Los beneficios por concepto del FOSE alcanzan al 40% de los hogares, aunque el 65% y el 44.7% de los beneficiarios en el ámbito urbano y rural respectivamente, son hogares no pobres [4]. Esto indica que el FOSE basado en un umbral de consumo es un mecanismo ineficiente

de subsidio de energía eléctrica para los hogares menos favorecidos, ya que la variable consumo por sí sola no captura la información necesaria para garantizar que no se generen problemas de identificación de beneficiarios. Al respecto, si bien el escenario ideal de un programa de subsidios es aquel en el que se beneficien únicamente los hogares pobres, la focalización completa es inviable dado los elevados costos de administración y recopilación de información que conllevan.

Adicionalmente, uno de los problemas con el subsidio eléctrico es que lleva a un sobreconsumo de electricidad, ya que los consumidores subsidiados no tienen incentivos para utilizar la energía óptimamente. Existe por su lado, información que evidencia que los consumidores de bajos y medianos recursos responden también al precio de manera incluso más significativa que los consumidores de altos ingresos. En Pakistán, por ejemplo, los subsidios impiden una recaudación considerable de fondos. Los subsidios contribuyen al desbalance fiscal que se encuentra en muchos países en desarrollo, haciendo además que los consumidores sean menos propensos a implementar medidas de eficiencia energética [3]. Una forma de implementar tarifas auto-sostenibles es permitir a los precios variar en tiempo real, dado que los costos en horas punta son mucho mayores que en horarios normales. Por tanto, las técnicas DSM proveen una manera de optimizar las inversiones en infraestructura asegurando que el crecimiento es eficiente.

Por otra parte, el Perú cuenta también con horarios de tarifación “hora punta”, en los cuales el precio del consumo energético es mayor que fuera del mismo, que es una tarifación tipo TOU, como veremos más adelante.

Actualmente, deben tomarse en consideración para la implementación de los sistemas, la disociación de las actividades implicadas en el sector eléctrico; entre las empresas que permiten una competencia libre (generación y venta), así como las que se realizan bajo un monopolio regulado (transmisión y distribución).

En resumen, en función de la información recopilada en experiencias en países emergentes, los gobiernos deberían comenzar su programa mediante la reforma de precios y tarifación por defecto. Como regla general, los precios deben proporcionar a los consumidores el costo de los recursos utilizados para crear un producto, y proporcionar a los inversores las ganancias que ellos esperan por fabricarlo. Suponiendo la aceptación de la anterior premisa, la electricidad debería ser vista como un producto. Cuando los consumidores no ven el precio real de la electricidad en su facturación, ellos sobreconsumirán energía lo que llevará a un gasto excesivo de capital para abastecer la demanda mediante generación económicamente no eficiente. Esto es especialmente cierto durante periodos pico, cuando el costo de producir electricidad es mayor, debido a que la electricidad no puede ser almacenada en grandes cantidades por razones técnicas.

2.2. Mallas Inteligentes

Las mallas inteligentes, o *Smart Grids* en inglés, son la respuesta natural a la necesidad de interconexión de los sistemas a fin de lograr sinergias significativas y mejorar la operación individual y grupal; y a la ‘invasión’ y crecimiento tecnológico actual. Conceptualmente, se trata de una red que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentran conectados a ella, esto es, generadores, consumidores y aquellos que son ambas cosas a la vez, con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible.

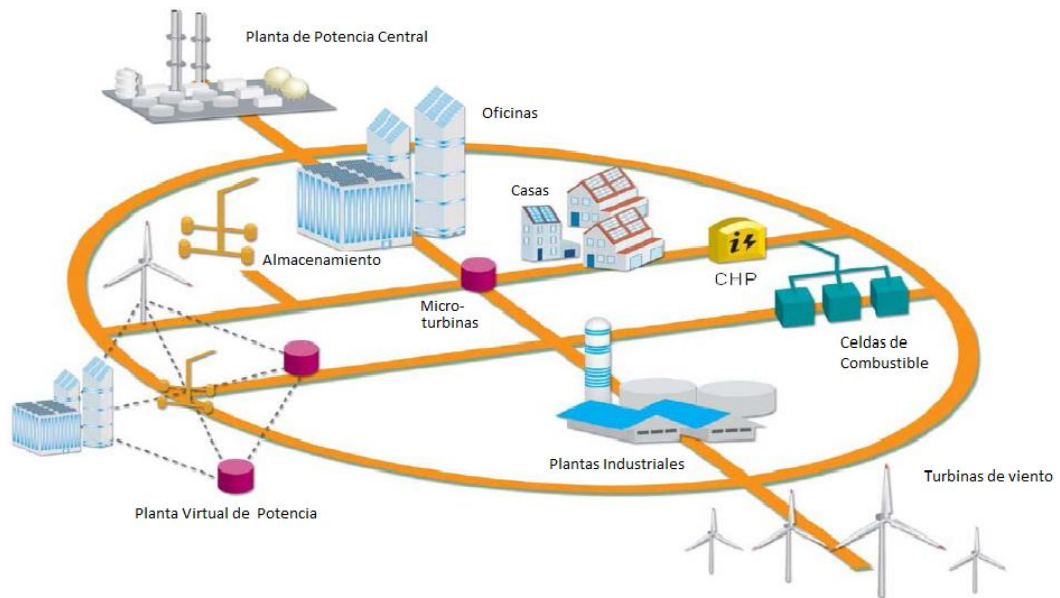


Figura 2.4: Estructura de una Malla Inteligente. Fuente: *“The Power of Knowledge Enabling the Smart Grid”*.

Las mallas inteligentes mejoran la confiabilidad, el desempeño operativo y la productividad del sistema eléctrico; incrementando la eficiencia en la distribución, reduciendo las emisiones de carbono, incentivando a los consumidores a administrar su uso eléctrico ahorrando dinero, sin comprometer su estilo de vida y comodidad.

En resumen, la malla inteligente es la integración de todos los componentes del sistema eléctrico para la optimización de todas sus interrelaciones con miras de mejorar el desempeño macro e individual de sus componentes. Estos sistemas permiten además optimizar la integración e incrementa la penetración de la energía renovable. Las fuentes de generación dejarían de estar únicamente centralizadas, y las nuevas tecnologías ayudarían a maximizar la utilización de los circuitos y recursos disponibles en el sistema, prediciendo y minimizando además, las situación de riesgo y reduciendo los picos de la

demanda (además de la demanda en sí misma) con mayor flexibilidad para los operadores de la red. Una clasificación general de los sistemas de Mallas Inteligentes, propuesta por *General Electric* [38], es mostrada en la figura 2.5.



Figura 2.5: Clasificación de las Mallas Inteligentes. Fuente *General Electric*.

La evolución de los sistemas tradicionales hacia las Mallas Inteligentes involucra una serie de mejoras y cambios operativos fundamentales, mostrados en la figura 2.6.



Figura 2.6: Malla Inteligente vs Sistema Tradicional. Fuente *General Electric*.

Las mallas inteligentes involucran una plataforma tecnológica de altas prestaciones y su evolución es altamente incierta encontrándose aún en una etapa inicial con el desarrollo y estandarización de diversas tecnologías aún a niveles de investigación y

desarrollo y unas aún escasas de implementaciones pilotos. El planeamiento para su implementación tiene muchos objetivos y múltiples perspectivas, requiriendo por tanto, un análisis n-dimensional. Influenciada altamente por el comportamiento estocástico de los consumidores finales, las etapas de diseño de las mallas inteligentes deben tener especificados claramente el alcance e implicancias de sus supuestos. La estructura bajo la cual trabajarían las mallas inteligentes, según *General Electric (GE)*, es mostrada en la figura 2.7.

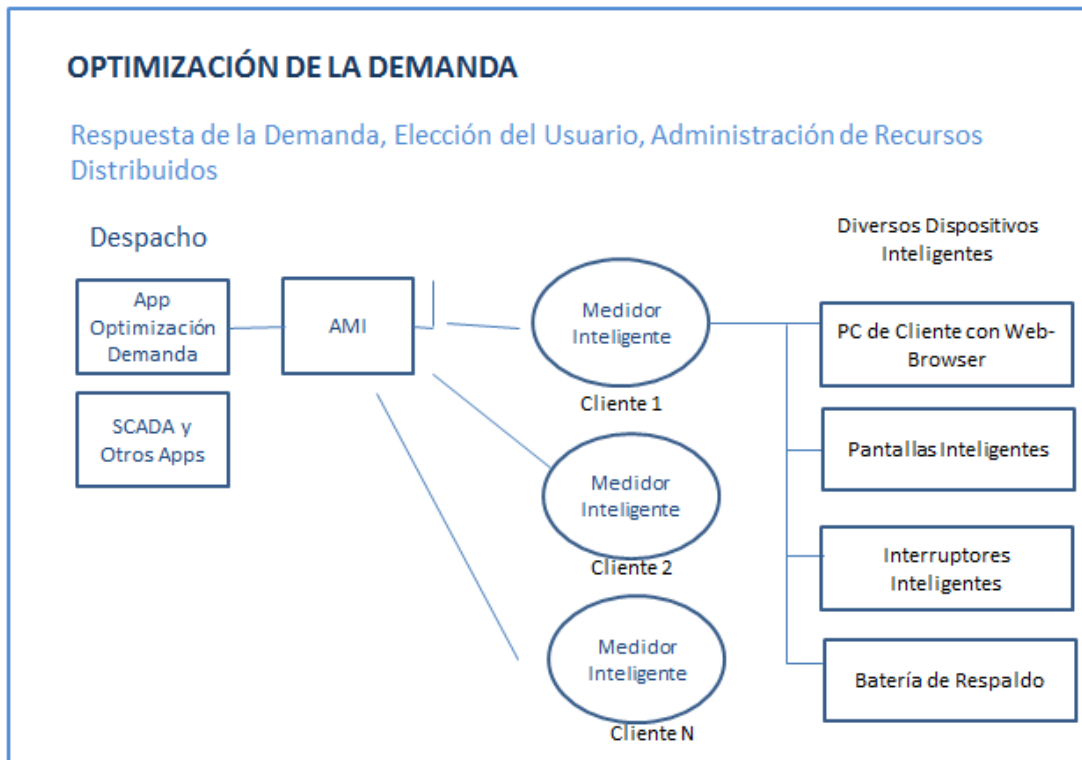


Figura 2.7: Arquitectura propuesta por GE para optimizar demandas– Mallas Inteligente. Fuente *General Electric*.

2.2.1. Características Principales de las Mallas Inteligentes: El desarrollo masivo exitoso de esta tecnología depende de un entendimiento claro de sus características e implicancias:

- Es una solución de largo plazo y continua evolución.
- Es una solución integrada basada en arquitecturas abiertas.
- No depende de una tecnología en particular y cualquiera puede desarrollar soluciones y tecnología.
- Se implementa sobre la infraestructura existente.
- Provee un alto nivel de integración a nivel empresarial.
- Cuenta con un enfoque de desarrollo largo plazo y amplia escala.

- Se orienta al desarrollo de arquitecturas de generación descentralizadas permitiendo el funcionamiento de instalaciones de menor tamaño (generación distribuida) y a la mejora de la integración de la generación intermitente y nuevas tecnologías de almacenamiento (posibilitando, por ejemplo, la penetración del vehículo eléctrico). La arquitectura propuesta por *General Electric* es mostrada en la figura 2.8.
- Posee un enfoque de inclusión activa de la demanda, brindando herramientas e información para la gestión energética de los consumidores.

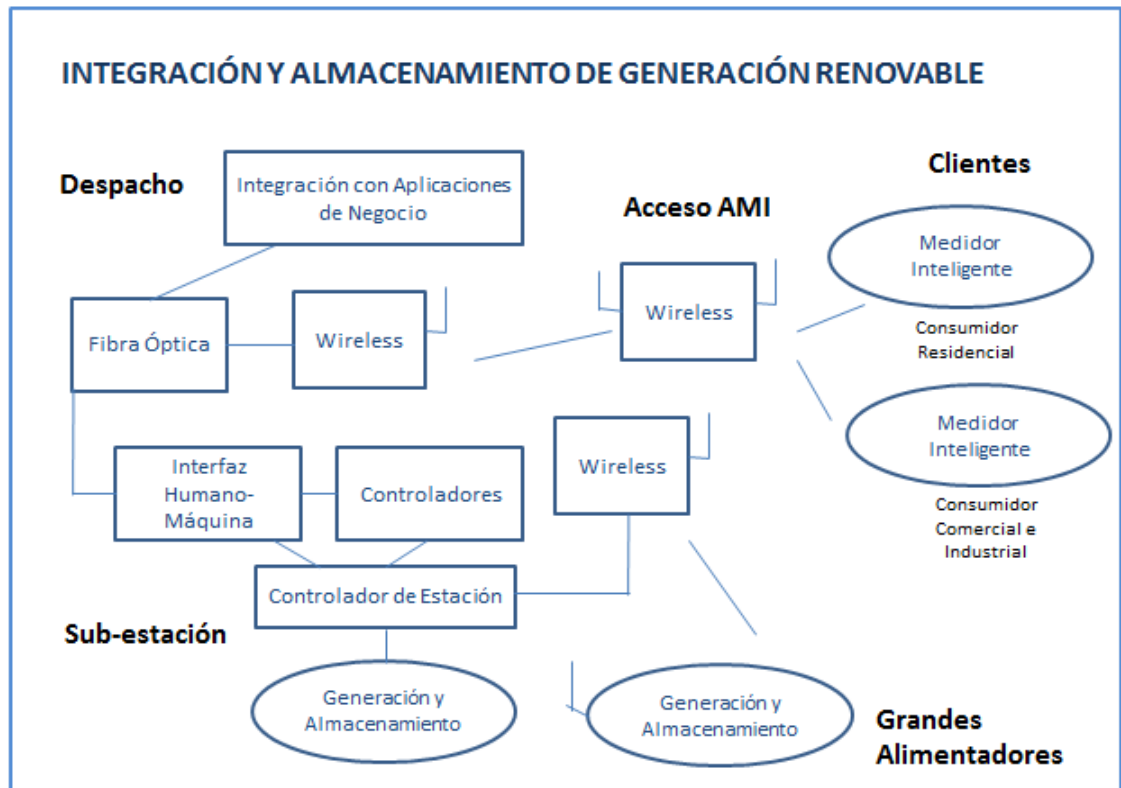


Figura 2.8: Arquitectura propuesta por GE para integración de Mallas Inteligentes.

Fuente: *General Electric*.

2.2.2. Barrera en el Desarrollo de Mallas Inteligentes: Entre las principales barreras para el desarrollo acelerado de las mallas inteligentes, se encuentran:

- Falta de tecnologías estándares y madurez tecnológica
- Escasas pruebas piloto en escalas insuficientes (supuestos poco fiables en diferentes escenarios)
- Los costos de inversión y operación son aún demasiado altos por no beneficiarse de economías de escala.
- Falta de concientización por parte de los reguladores, en cuanto a los beneficios en

la eficiencia energética, reducción de emisiones de carbono y en la necesidad de incrementar la inversión en las redes eléctricas.

- La normativa y regulación vigente de algunos países, en algunos casos impone limitaciones o barreras técnicas y en otras, no genera los incentivos suficientes para la inversión.
- Acceso limitado a fuentes de financiación al cambio de modelos de negocio, haciendo menos rentables las inversiones necesarias.
- La confidencialidad y privacidad de los datos podría verse amenazada generando perjuicios para las empresas si son utilizados de manera inadecuada.

Actualmente, Estados Unidos, Oceanía y Europa están desarrollando plataformas pilotos de implementación de Mallas Inteligentes. Empresas eléctricas líderes a nivel mundial, como *ABB*, *General Electric* y *Siemens* se están enfocando en el desarrollo de la tecnología para la infraestructura sostenible de estos sistemas, haciéndose, por tanto, necesario a corto plazo, la respuesta por las entidades reguladoras, mediante el establecimiento de estándares que faciliten el desarrollo desde diferentes frentes, la integración de las mejores opciones y la libre competencia para el desarrollo de un mercado atractivo. Algunos esfuerzos en estas direcciones, aunque aún de manera global y poco clara, se han desarrollado. Un ejemplo de ello se encuentra en Nueva Zelanda, donde las empresas fabricantes de medidores inteligentes tienen como plazo el año 2013 para estandarizar su tecnología.

Capítulo III

El Consumidor Residencial Peruano

El comportamiento del consumidor residencial peruano responde a la coyuntura nacional y regional así como a factores externos e internos. Este capítulo busca clasificar convenientemente las respuestas actuales del consumidor residencial peruano a fin de poder seleccionarlos en grupos de trabajo sobre los cuales se desarrollen políticas con mayor posibilidad de éxito.

3.1. Factores Determinantes en el Consumo Eléctrico Residencial

Para poder proponer una estrategia de control capaz de incidir significativamente sobre la curva de demanda eléctrica residencial, es necesario identificar los factores claves que repercuten directa y considerablemente sobre la misma. Son diversos los factores que pueden influir en el consumo eléctrico residencial y pueden agruparse en físicos y de conducta, no necesariamente sin correlación [12]. Para poder *predecir* el perfil individual de la curva de carga doméstica o el perfil agregado de un *grupo de casas*, es esencial identificar los patrones de uso de energía residencial en función de estos factores. La diversidad de estos recae no sólo en la variedad de climas, ubicación geográfica, condiciones físicas de la casa o tenencia de electrodomésticos; sino que tiene un alto contenido de conducta responsable, cultural y social. Así, aún con las mismas características físicas, dos hogares ‘similares’ pueden variar su perfil de consumo eléctrico de manera significativa.

La demanda de la energía puede ser categorizada en dos grupos de determinantes:

- Determinantes Conductuales: Tienen una alta relación con el factor humano y una alta correlación con los hábitos de las personas, pudiendo estar ligeramente influenciados por las estaciones. Existen diversos estudios para la relación entre el uso de la electricidad y el comportamiento humano [13]. Los factores de conducta contemplan la frecuencia de uso de los electrodomésticos, que son parte de parámetros ‘flexibles’ por su relativa facilidad para influir sobre ellos. La permanencia en los ambientes influye también en este tipo de determinantes, ya

que por ejemplo, algunos usuarios podrían mantener la casa a alguna temperatura media al estar fuera, mientras otros desactivan completamente el sistema de calefacción. Algunas personas también, programan los electrodomésticos para su funcionamiento cuando se encuentren fuera de casa o cuando los horarios no sean molestos o estén permitidos dentro de la zona en la que viven.

- Determinantes Físicos: Estos tienen una alta correlación con el clima y el diseño de los edificios y poca con los hábitos de los ocupantes. Incluyen el tamaño y forma de los ambientes, las estaciones del año, el sistema de aire acondicionado y el equipamiento eléctrico existente, que además son parte de parámetros 'fijos'. No obstante, el factor conducta tiene también incidencia sobre este determinante, dado que, para las mismas condiciones de diseño, la temperatura *confort* y los hábitos de uso variarían entre una casa y otra, naturalmente influenciada también por el tiempo de permanencia en la misma.

Los factores determinantes tomados en cuenta en diversos análisis de respuesta de la demanda, pueden ser sub-clasificados en 7 grupos:

- Patrones geográficos (determinante físico).
- Patrones de tenencia de electrodomésticos (determinante físico).
- Patrones de permanencia en el hogar (determinante conductual).
- Patrones de utilización de electrodomésticos (determinante conductual).
- Patrones climáticos (determinante físico).
- Patrones culturales (determinante conductual).
- Patrones socioeconómicos (determinante físico).

La manera en la que cada patrón influye sobre el consumo energético es importante al definir las características y resultados deseados de la estrategia de control propuesta y dependerá en gran medida de la misma.

3.1.1. Patrones Geográficos: Estos patrones, que no deben confundirse con los factores climáticos, hacen referencia a la ubicación de los usuarios *objetivo* a quienes se les aplicaría el control, idealmente universal. La implementación de una técnica de control involucra infraestructura y logística necesaria para el monitoreo, control y supervisión; y responde a un análisis costo-beneficio de parte de la empresa distribuidora. Dado que el sistema de comunicación es vital y necesario para establecer cualquier tipo de control de la demanda, como enviar información en tiempo real, obtener lectura de medidores o

controlar directamente las cargas; usualmente los patrones geográficos responden a la ubicación en la que se encuentra una alta densidad de usuarios clave.

Los patrones geográficos pueden considerarse pragmáticamente como un filtro particular del objetivo de control. Como se indicara líneas arriba, esta es la respuesta a la necesidad de optimización de recursos, por lo que este patrón responde a la ubicación-clasificación del público *objetivo* en función de criterios relacionados con los demás patrones, sin que eso conlleve a una correlación que imposibilite manejar las variables de forma aislada. Partiendo de esta consideración, será necesaria identificar las características del público objetivo a fin de incrementar las posibilidades de una implementación económicamente eficiente tomando en cuenta los requerimientos del control a implementar. Las preguntas que serán necesarias, responden a encontrar las características que deben cumplir los usuarios *objetivo* para la implementación del control propuesto, como: ¿dónde se encuentra la mayor concentración de utilización residencial?, ¿qué electrodomésticos y/o cargas eléctricas en general son las de mayor consumo energético?, ¿cuáles son las cargas que influyen de manera moderada la comodidad del usuario?, ¿qué porcentaje y quienes son las personas que tienen estos electrodomésticos?, ¿los grupos identificados comparten similares condiciones climáticas?. La información necesaria para responder estas interrogantes se encuentran en las encuestas de hogares, patrones de consumo, información socio-económica, histórica y geográficamente clasificada.

3.1.2. Patrones de Tenencia de Electrodomésticos: El consumo eléctrico residencial recae inevitablemente en la tenencia de cargas siendo estas los puntos responsables directamente de la utilización de energía. En función del consumo y representatividad dentro del marco del público objetivo, se han identificado tres tipos de cargas:

- Cargas base: Son cargas necesarias que influyen directamente sobre el *comfort* del usuario final y cuya manipulación continua representa normalmente una disminución de su satisfacción con el programa. Independientemente del consumo que posean, su manipulación no es recomendable y se sugiere únicamente correcciones voluntarias. En este tipo de cargas se encuentra la refrigeradora, la iluminación, los ordenadores y los equipos de audio. Además, este tipo de cargas, y en especial la iluminación, son de sencilla optimización, por ejemplo con el reemplazo por luminarias fluorescentes compactas o la tecnología Led.
- Cargas de uso intensivo de energía (CUIE): Son las cargas que tienen altos consumos energéticos y con frecuencias y tiempos de consumo relativamente

bajos. Su manipulación causaría impactos leves sobre la satisfacción del cliente. Ejemplo de este tipo de cargas son los electrodomésticos de limpieza personal y de lavado de ropa. Un grupo importante perteneciente a este tipo de cargas son los electrodomésticos de consumo de agua caliente o tipo DHW por sus siglas en inglés (*Domestic Hot Water*) [12], cuyo consumo varía también con los patrones climáticos y conductuales, y cuyo valor es significativo.

- **Cargas especiales (CE):** Son cargas de alto consumo energético cuya manipulación tiene menor impacto sobre la comodidad del cliente final y puede ser gradual, no necesitándose que sea apagada completamente (control on-off) sino que pueden ser sujetas a variaciones graduales. Estas cargas son de baja tenencia en la población, pero son muy atractivas por el tipo de control que permiten realizar. En este tipo de cargas se incluyen los sistemas de aire acondicionado y calefacción; cuya potencia depende de diversos factores.

La tenencia de electrodomésticos no define por sí sola el perfil de consumo de un hogar, sino que es parte de un grupo complejo de decisiones tomadas a lo largo del día por sus ocupantes condicionados a su vez, por disponibilidad, tiempo y condiciones externas. Las diferentes casas, con el mismo equipamiento, pueden tener diferentes estilos.

3.1.3. Patrones de Permanencia en el Hogar: Para la optimización de los modelamientos de las cargas residenciales, deberían encontrarse relaciones entre los valores culturales y el uso de la energía a fin de encontrar la mejor manera de influir en el comportamiento de manera voluntaria por los usuarios. De cualquier forma, el patrón de uso está estrechamente relacionado con el periodo de vacancia de la casa. Por ejemplo, si las personas no están en casa, la mayoría de electrodomésticos no serán usados. En el perfil diario de uso de electrodomésticos, los ocupantes utilizan virtualmente muy poca potencia (resumida principalmente en tipo stand-by) durante la noche; y sólo lo necesario durante la mañana para la preparación del desayuno; al retornar en la noche (según sea el perfil de vacancia) las comidas son preparadas, la televisión vista y las duchas tomadas. La presencia de personas en el hogar determina de manera directa el tipo de curva de carga del mismo. Idealmente debería disponerse de la siguiente información, con el fin de determinar de manera más precisa, los patrones de uso eléctrico de las personas en el hogar [4], [12].

1. El número de miembros del hogar.
2. El tamaño de la vivienda por número de habitaciones.
3. El momento en que la primera persona se despierta en la mañana y en el que la última va a dormir.
4. El tiempo en el que la casa está ocupada durante el día.

Para la utilización más precisa de estos factores sobre el consumo eléctrico, será necesaria información fidedigna, histórica y validada concerniente.

3.1.4. Patrones de Utilización de Electrodomésticos: Estos patrones, directamente relacionados con los patrones de tendencias, incluyen la cantidad de horas de utilización, los momentos en los que estos son encendidos/apagados; la optimización en el uso, por ejemplo, durante el lavado de la ropa o la temperatura requerida para la ducha y la desconexión ante el desuso para eliminar la potencia de *stand-by*, capaz de representar hasta dos tercios del consumo [19]. La diversidad de electrodomésticos y conductas individuales en los hogares son grandes responsables de la variedad durante el día, de la curva de la demanda, sin embargo, la experiencia internacional y la información bibliográfica muestran que, en general, existe muy poca información de los patrones de uso para los electrodomésticos con respecto al momento en el que estos son utilizados. Para suplir parcialmente esta carencia de información disponible, existen normalmente datos en cuanto a las horas al día y a los días al mes que en promedio es utilizado cada electrodoméstico.

3.1.5. Patrones Climáticos: El factor ambiental influye de manera directa sobre la demanda eléctrica al condicionar el comportamiento de los usuarios, principalmente en dos factores: temperatura de utilización (tanto para electrodomésticos para la limpieza personal o la limpieza de ropa, como para los sistemas de calefacción / aire acondicionado), como en el tiempo y hora de uso. Los patrones climáticos dependen de los patrones geográficos y su influencia aumenta si abarcan condiciones extremas. En el Perú, por ejemplo, los patrones climáticos son relevantes en zonas como Puno, donde los electrodomésticos de calefacción (que son además de alto consumo) deberían ser representativos y de utilización frecuente. No obstante, el patrón tenencia de electrodomésticos y el factor económico influirán en la disposición de la población de los mismos. En zonas de clima templado o cálido, como Lima, los patrones climáticos, si bien difieren entre distritos, no son del todo determinantes y su influencia no resulta

necesariamente significativa entre algunas estaciones del año. En especial consideración, se tienen los electrodomésticos DHW pues tienen una dependencia energética directa con la temperatura ambiente y esta a su vez, tiene una dependencia con la estación del año; sin tomar aún en cuenta la diferencia conductual energética de los usuarios finales ante cambios de temperaturas.

3.1.6. Patrones Culturales: La respuesta de la demanda, en términos ideales de implementación, depende crucialmente de la respuesta consciente, voluntaria e informada de los usuarios. Los patrones culturales son además de conductuales, semi-externos pues están supeditados a la información, educación y grado de concientización logrados, la mayoría de las veces, con campañas de información eficientes y reiterativas. Una coyuntura cultural de respeto al medio-ambiente e información energética referente a los hábitos de consumo, influyen de manera positiva, aunque poco predecible, en la respuesta de la demanda. Los patrones culturales son normalmente poco precisos al ser modelados y sus respuestas muy complicadas de predecir. Estos patrones suelen utilizarse como indicadores macro para las campañas de concientización energética, sobre todo en países emergentes como el Perú. En este aspecto, dada la relación del consumo eléctrico con los diferentes niveles culturales de la población y su conocimiento/actitudes hacia las acciones energéticamente eficientes, se levanta una alerta, puesto que los consumidores están escasamente informados al respecto y, por tanto, no cuentan con las herramientas necesarias para optimizar su comportamiento energético.

3.1.7. Patrones Socioeconómicos: Como se indica en [20], la elasticidad-precio en el Perú es mayor en los hogares más pobre debido a la menor penetración de artefactos eléctricos, generando una mayor posibilidad de sustitución de fuentes energéticas. Del mismo modo, en el caso de los hogares de mayores ingresos, con una considerable mayor tenencia de bienes durables, la posibilidad de sustitución de consumo eléctrico es menor, limitándose la acción a cambios de patrones de utilización (conductuales), situación que también se observa en otros países [4]. En este punto juega un papel importante los programas de subsidio, puesto que en el caso de los hogares con una elasticidad-precio elevada, es decir aquellos que tienen un menor nivel de ingresos [20], un subsidio que reduzca la tarifa facturada estimulará un mayor nivel de consumo eléctrico. Los patrones socioeconómicos son determinantes al momento de definir el público objetivo para la aplicación de programas DSM.

La combinación de las influencias de cada patrón listado, de acuerdo con la coyuntura donde desee aplicarse programas DSM, es una entrada necesaria en la estimación del consumo actual a evaluarse, así como para la predicción de la respuesta ante diferentes niveles y estrategias de control.

3.2.Métodos de Modelamiento de Consumo Eléctrico Residencial

El consumo energético en los hogares varía drásticamente durante las horas del día y los diferentes días del año. Aunque un único electrodoméstico puede usar menos de 1kWh por día, el uso de electrodomésticos en general resulta en altos picos de demanda [9]. Cuando la demanda de varios electrodomésticos ocurre al mismo tiempo, se puede producir un pico de varios kilowatts. Por ello es deseable que el sector doméstico alcance un perfil de demanda eléctrica más suave, con miras de optimizar la eficiencia del sistema eléctrico macro. Los componentes del consumo eléctrico en el hogar pueden ser clasificados en grandes términos como “predecibles”, “moderadamente predecibles” e “impredecibles”. El primero ocurre cuando los ambientes están desocupados o los habitantes están durmiendo. El consumo “moderadamente predecible” está referido a los patrones de conducta de los residentes. Por ejemplo, muchas personas ven programas televisivos a horas regulares de la noche cada día de semana laboral. Por último, el consumo “impredecible” describe la mayoría del uso energético doméstico y tiende a ser irregular. Estos tres tipos de consumo pueden ser encontrados en la mayoría de los hogares, pero esta simple clasificación no puede explicar por qué los perfiles de demanda son tan diferentes entre hogares con condiciones parecidas. Las variaciones entre casas son resultado de las diferencias en las actividades a nivel micro; como el tiempo tomado en cada actividad. Fechner [10] mostró hasta un 50% de variación en el consumo eléctrico ocurrido entre seis chefs, todos cocinando la misma receta con el mismo equipo. Estudios en Estados Unidos, Holanda e Reino Unido estiman que el 26 – 35% de la energía usada en casa es debido al comportamiento de los habitantes [9]. Stem [11] argumenta que el consumo de energía puede ser reducido al proveerle al consumidor mayor información para su elección acerca de prácticas de uso de energía. En general, el cambio de comportamiento energético tiene un potencial promisorio para la conservación de la energía.

El gran desafío del modelamiento del consumidor residencial radica en varios aspectos. Primero, la cantidad de datos es altamente desagregada, es decir, la dispersión de la información dificulta la agrupación con significado de diversas variables importantes. Segundo es muy complicado reproducir de manera precisa las características de las

curvas de cargas de todos los tipos de electrodomésticos, o los más comunes, presentes en los hogares, ya que incluso dentro de la misma categoría estos varían de manera considerable por factores de diseño de cada fabricante y por las condiciones de uso. Otro factor dominante es la presencia de una cantidad amplia de factores (variables) que afectan el consumo, entre ellos los socioeconómicos, físicos y ambientales, mencionados en el apartado anterior. Es por tanto, de suma importancia el modelamiento paulatino con la información precisa, confiable y disponible, y dentro de presunciones básicas que faciliten compensar razonablemente la carencia de datos. La figura 3.1 muestra la toma principal de información entrada para el modelamiento del consumo residencial.

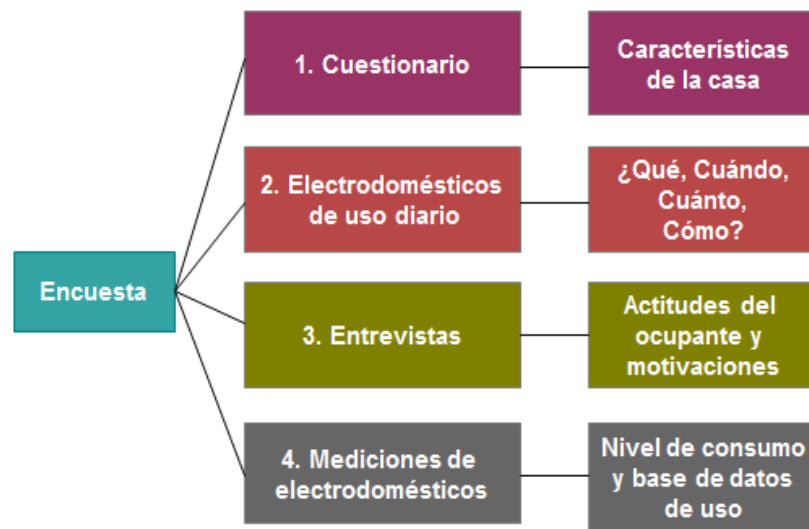


Figura 3.1: Clasificación de información recopilada en campo. Fuente: “*A Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Building in the UK*”.

Existen diversas propuestas de modelamiento del consumo residencial, la elección dependerá del tipo, cantidad y confiabilidad de los datos y del tipo de salida requerida.

3.2.1. Método Simple tipo Grupos: Este método propuesto en [12] predice el perfil diario de carga mediante un análisis de grupos basado en escenarios de ocupación, utilizando información estadística. Este método puede ser utilizado a nivel macro (nacional, regional) y micro (casas individuales). Para calcular el perfil de carga eléctrica de un electrodoméstico, las entradas requeridas son los consumos de energía diarios promedio. Para calcular el perfil de consumo de los electrodomésticos DHW, la entrada requerida es el consumo diario de agua caliente de la casa. El factor climático influye en el consumo diario de cada componente.

Este método separa las cargas eléctricas según su tipo de consumo o uso y las consideraciones que toma en cuenta por tipo son:

1. Bienes Marrones: Bienes de consumo electrónico como televisores, reproductores DVD, etc. La frecuencia de uso de estos equipos depende del estilo de vida de cada hogar.
2. Electrodomésticos Fríos: Incluye la refrigeradora, los freezers, las congeladoras, etc. El consumo de este tipo de cargas se ha visto influenciado por el cambio de los patrones de compra de comida (reducción), obligando indirectamente a la compra de equipos de refrigeración.
3. Electrodomésticos de Cocina: Incluye los hornos electrónicos, los hornos microondas, las cocinas eléctricas, etc. En [12] se indica que el número de personas en una casa, es el indicador clave de uso para este tipo de electrodomésticos.
4. Electrodomésticos de Lavado: Incluye las lavadoras de ropa, las secadoras, las centrifugas, las lavadoras de platos, etc. La frecuencia de utilización de este tipo de electrodomésticos depende del número de ocupantes de la casa.
5. Electrodomésticos misceláneos: Incluye las aspiradoras, las planchas, las duchas eléctricas, las bombas, las computadoras, etc. El uso de este tipo de cargas depende de los estilos de vida y de la cantidad de ocupantes de cada hogar.
6. Iluminación Artificial: Es también altamente influenciada por la estación, y la ecuación 3.1 utilizada para calcular el consumo de energía de la luz eléctrica es:

$$E_1 = \left(\frac{I_{mean}}{Eff} \right) \times H \times A_{floor} \times \left(\frac{N_p}{N_r} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

- E_1 : Consumo de energía diario en iluminación eléctrica (kWh/día).
- I_{mean} : Nivel de iluminación promedio (lux).
- H : Horas de iluminación artificial (h).
- Eff : Eficiencia de la iluminación.
- A_{floor} : Área del piso de la casa (m^2).
- N_p : Número de ocupantes de la casa.
- N_r : Número de ambientes de la casa.

El patrón de encendido/apagado de la iluminación depende de la luz natural y de los patrones de ocupación. Si la luz interna requerida es menor que la luz disponible entonces la luz se encenderá cuando la habitación esté ocupada. En invierno, dependiendo de la ubicación geográfica de la casa, la luz disponible en tempranas horas de la mañana podría no ser suficiente, situación poco probable para días de verano.

El cálculo del consumo de energía diario de cada electrodoméstico es calculado usando la ecuación 3.2:

$$E_a = N \times \sum A \quad (3.2)$$

Donde:

- E_a : Consumo diario de electrodomésticos en la casa (kWh/día).
- N : Número de ocupantes.
- A : Consumo de energía del electrodoméstico per cápita.

Este método contempla, por falta de información detallada de patrones de ocupación, cinco escenarios comunes:

- Escenario 1: Periodo desocupado de 9 a.m. a 1 p.m.
- Escenario 2: Periodo desocupado de 9 a.m. a 6 p.m.
- Escenario 3: Casa ocupada todo el tiempo.
- Escenario 4: Periodo desocupado de 1 p.m. a 6 p.m.

Tabla 3.1: Escenarios de Ocupación para método grupos.

| Patrón de ocupación para una casa de 3 personas | | |
|---|-----------------------------------|--------------------|
| Escenarios | Tipo | Periodo no ocupado |
| 1 | Trabajo a tiempo parcial (mañana) | 9:00 – 13:00 |
| 2 | Trabajo a tiempo completo | 9:00 – 18:00 |
| 3 | No trabaja | - |
| 4 | Trabajo a tiempo parcial (tarde) | 13:00 – 18:00 |

Para modelar el perfil residencial de carga energética diario, este modelo considera el peor de los casos, escenario en el cual todos los electrodomésticos serán utilizados ese día. Los patrones climáticos no son considerados para los electrodomésticos y un patrón aleatorio para cada carga es generado con la técnica de Generación de Número Aleatorio. La agregación de todos los perfiles de las cargas generará un perfil de carga eléctrico diarios para un escenario establecido. Este perfil es llamado Perfil Específico porque está referido a un escenario de ocupación específico (patrón de ocupación). Para cada escenario, el perfil diario de carga puede ser diferente de un día a otro. La

operación computacional para los valores aleatorios se repiten 20 veces para cada escenario y el perfil aleatorio agregado aparece como una curva a lo largo del día. La figura 3.2 muestra el diagrama de flujo para la agregación utilizado en este método.

En la figura, A_n es el nombre del electrodoméstico; E_n es el consumo diario promedio de cada electrodoméstico, P_n es el perfil aleatorio para cada electrodomésticos, P_{si} es el perfil específico para cada escenario de ocupación. Para conseguir el modelamiento del perfil típico y lograr un perfil de carga general, este método agrega los cinco perfiles específicos. La figura 3.3 muestra el diagrama de flujo para generar la curva de carga típica. En esta figura, P_{s1} , P_{s2} , P_{s3} , P_{s4} , P_{s5} son los perfiles específicos de cada escenario y P_T es el perfil típico de una casa promedio. Para conseguir el perfil de carga regional/nacional, es necesaria la información referente a la composición de la casa de la ubicación respectiva. La figura 3.4 muestra el diagrama de flujo para generar la curva de carga regional/nacional. En esta figura, P_{n1} , P_{n2} , P_{n3} , P_{n4} , P_{n5} , P_{n6} , son los perfiles típicos de las diferentes composiciones de la casa (de 1 a 6 ocupantes), N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , N_5 , N_6 son los porcentajes de número de personas de la casa en la región y P_A es el perfil de carga regional.

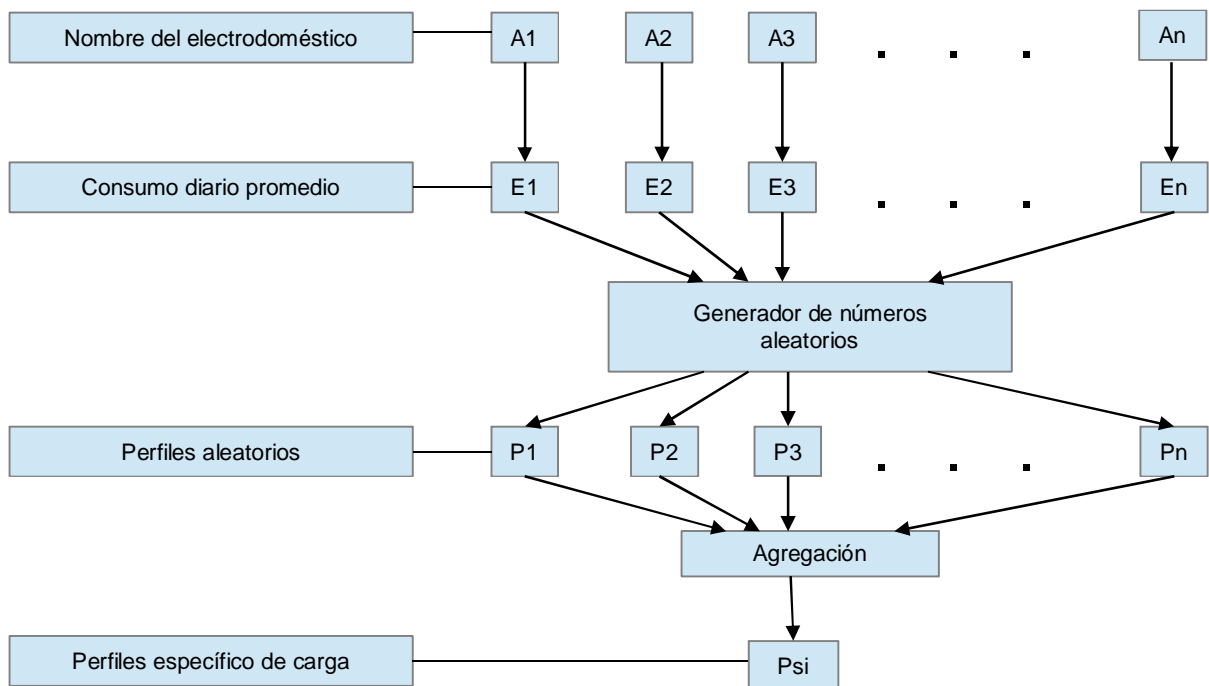


Figura 3.2: Diagrama de Flujo para la generación de Perfil Específico por método de grupos. Fuente: *A Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Building in the UK*.

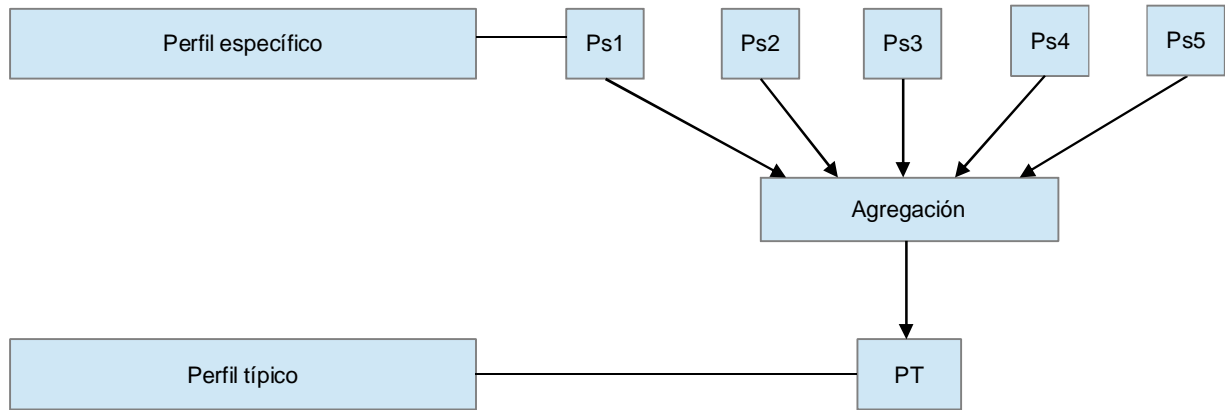


Figura 3.3: Diagrama de flujo para el perfil típico por método de grupos. Fuente: A *Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Building in the UK*.

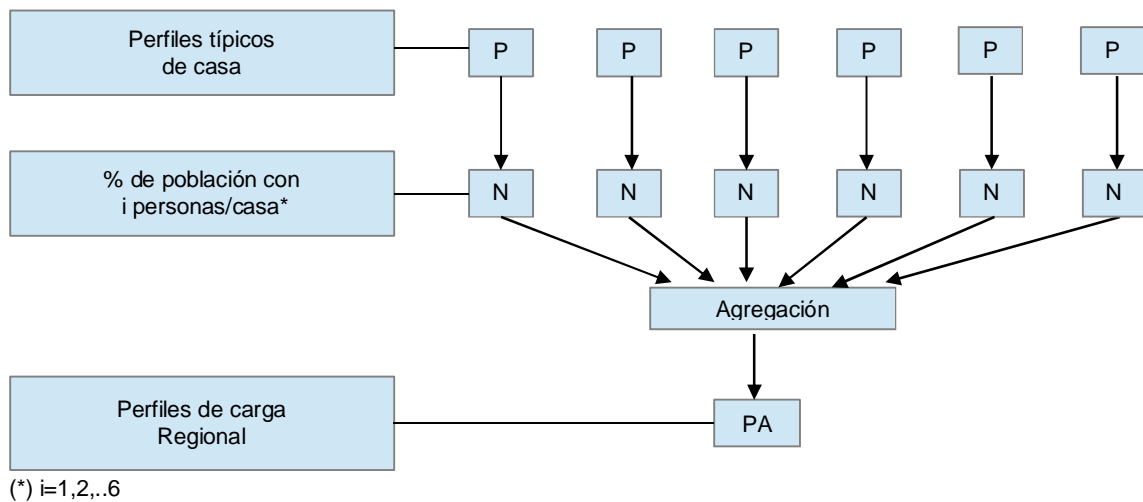


Figura 3.4: Diagrama de flujo para generar el perfil regional por método de grupos. Fuente: A *Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Building in the UK*.

Este método considera valores de uso promedios para los electrodomésticos, excepto los de calefacción y los de tipo DHW.

- Carga de Calefacción: La curva de carga para la calefacción depende de las características térmicas y la orientación de la casa, la temperatura de control, la temperatura interna del aire, el clima, etc. La carga de calentamiento fue simulada utilizando el método térmico de resistencia presentado en [22, 23]. Las ecuaciones son:

$$C \frac{dT}{dt} = \Phi_{heat/cool} + \Phi_{cond} + \Phi_{vent} + \Phi_{solar} + \Phi_{sp} \quad (3.3)$$

Donde:

- C: capacidad térmica del nodo.
- $\Phi_{calor/frio}$: energía de calentamiento/enfriamiento auxiliar del ambiente.
- Φ_{cond} : transferencia de calor conductivo a través de los límites de la casa (paredes y ventanas).
- Φ_{vent} : transferencia de calor de ventilación a través de la casa.
- Φ_{solar} : ganancia solar.
- Φ_{sp} : ganancia interna de la iluminación eléctrica, las personas y los electrodomésticos.

La simulación detallada de la ecuación es mostrada en [22,23]. Para calcular la carga de calefacción doméstica se escogieron cuatro tipologías de casa. Los hábitos de los ocupantes se incluyeron en el modelo térmico con un algoritmo de control relacionado a los patrones de consumo.

Los sistemas de aire acondicionado, en particular, es una tarea crítica para el modelamiento preciso del comportamiento eléctrico residencial dado que consume una gran porción de potencia reactiva, especialmente durante el arranque y porque el encendido de un sistema de aire acondicionado usualmente tiene un impacto significativo en los transitorios en términos de desviación de frecuencia y voltaje. El efecto se incrementa en los sistemas con un alto porcentaje de tenencia de estos dispositivos. En [18] se presenta un modelo desarrollado en *Grid-Lab* [40], donde el efecto del aire acondicionado se estima como:

$$E_A = U_A(T_A - T_O) + H_M(T_A - T_M) + C_A \frac{\Delta T_A}{\Delta T} \quad (3.4)$$

Donde:

- E_A : Capacidad para el calentamiento/enfriamiento del aire acondicionado (kWh/día)
- U_A : Conductancia térmica equivalente del cerramiento (paredes y ventanas) de la casa a través del cual se transfiere el calor de fuera hacia la casa
- C_A : Masa del aire.
- T_A : Temperatura del aire de la habitación
- T_O : Temperatura del aire exterior
- H_M : Conductancia de la masa sólida interior de la habitación.
- T_M : Temperatura de la masa sólida dentro de la habitación.

- **Carga DHW:** Incluyen los electrodomésticos de lavado de ropa, higiene personal, hervidores eléctricos y lavado de vajilla. La energía usada por los electrodomésticos DHW dependen de varios factores, como la temperatura requerida del agua, el volumen requerido por persona y el tamaño de la casa. Casas individuales tienen una amplia variación en el consumo; por lo que el método utiliza los consumos diarios promedio de agua de las personas para el cálculo del perfil energético. El consumo energético diario puede ser calculado usando la ecuación 3.5.

$$E_{hw} = \frac{C_p \rho V (T_{out} - T_{in.})}{3600} \quad (3.5)$$

Donde:

- E_{hw} : Carga doméstica de agua caliente (kWh/día).
- C_p : Calor específico del agua (4.187 kJ/kg K).
- ρ : Densidad del agua (1000kg/m³).
- V : Volumen de agua/día consumido por electrodoméstico (m³/día).
- T_{out} : Temperatura de salida del agua.
- T_{in} : Temperatura de ingreso del agua.

Para lograr que el método sea sencillo de usar para cualquier usuario, incluye una interfaz de software que le permite a los diseñadores prevenir el la curva del comportamiento eléctrico individual, grupal o regional residencial, a fin de diseñar y planificar un sistema de energía renovable. La información de entrada está clasificada como:

- Ubicación de la comunidad o casa.
- Información de la casa como el número de ocupantes, el tiempo de ocupación y periodos de actividad de la casa, etc.
- Información del uso de los electrodomésticos como el tipo, cantidad de horas, etc.
- Información física de la casa, como tipo, orientación, tamaño, etc.

El programa provee el consumo de energía en cualquier periodo de tiempo, y permite configurar el intervalo de tiempo para la simulación en 1, 5, 15 minutos y media hora; en función del requerimiento de diseño.

Los modelos de los electrodomésticos obtenidos con este método, fueron validados con la información estadística provista por la Asociación de Investigación de Carga Eléctrica del Reino Unido [14].

El modelo de los electrodomésticos de calefacción fue validado por el software de simulación *Esp-r* [14].

3.2.2. Modelo Tridimensional: Este modelo busca guiar estrategias legales y gubernamentales clasificando los consumidores por la voluntad (potencial) que tienen con respecto a modificar sus patrones de consumo con fines ecológicos como los aspectos físicos que delimitan su campo de acción. Así, este modelo incluye la influencia de los patrones de tenencia de electrodomésticos, la infraestructura/economía y el comportamiento a fin de crear un perfil del comportamiento eléctrico residencial y propone un modelo tridimensional considerando los niveles de eficiencia energética, el nivel ecológico del comportamiento energético de la casa y la duración de la ocupación de la misma durante el día. Este modelo plantea ocho tipos de consumidores de energía residenciales:

- Ecológicos proactivos.
- Ecológicos reactivos.
- Ecológicos comprometidos.
- Ocupantes permanentes del hogar.
- Gastadores inconscientes.
- Gastadores regulares.
- Gastadores a lo largo del día
- Gastadores no comprometidos.

Estos arquetipos se resumen en la figura 3.5 y las características de cada arquetipo se resumen en la tabla 3.2.

Estos arquetipos están diseñados para guiar la intervención legal y política de guía energética, considerando la predisposición de los usuarios y el alcance de respuesta de los mismos. Este modelo contempla dos tipos de políticas energéticas; las nacionales en un nivel estratégico, y las locales en un nivel operativo.

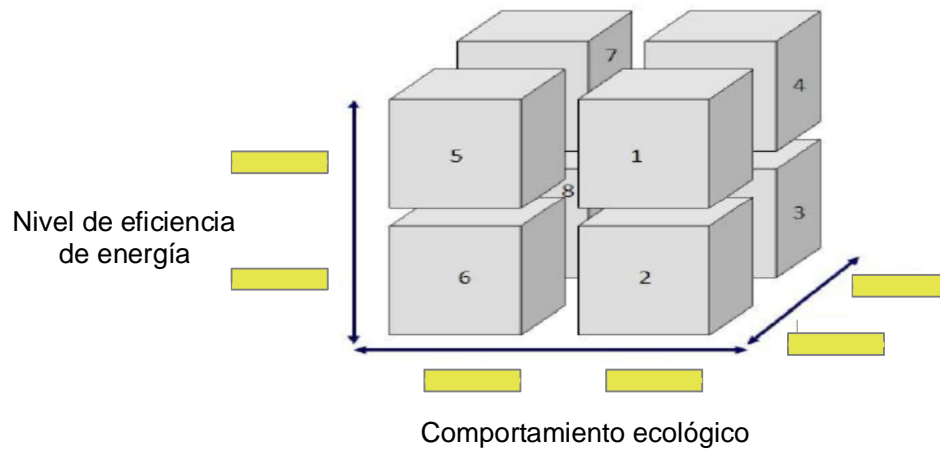


Figura 3.5: Arquetipo tridimensional para el modelo de consumo de energía residencial. Fuente: “Three-Dimensional Model of Residential Energy Consumer Archetypes for Local Energy Policy Design in the UK”

Tabla 3.2: Atributos de los arquetipos de consumidores energéticos residenciales

| Arquetipos | Atributos | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Nivel de eficiencia energética | Comportamiento ecológico | Duración de ocupación diaria |
| Ecológico proactivo | alto | alto | corto |
| Ecológico reactivos | bajo | alto | corto |
| Ecológico comprometidos | bajo | alto | largo |
| Ocupantes permanentes del hogar | alto | alto | largo |
| Gastadores inconscientes | alto | bajo | corto |
| Gastadores regulares | bajo | bajo | corto |
| Gastadores a lo largo del día | alto | bajo | largo |
| gastadores no comprometidos | bajo | bajo | largo |

En el sector residencial, la eficiencia de la intervención de políticas energéticas depende del enfoque en las casas “correctas”. Por ejemplo, la instalación de medidores inteligentes donde los ocupantes no son sensibles energéticamente sería una intervención ineficiente. Este modelo propone las acciones a llevarse a cabo para cada arquetipo de consumidor energético residencial [23] a fin de incrementar su potencial o limitar sus efectos negativos.

3.2.3. Modelamiento Redes Neuronales: El modelamiento por redes neuronales es una de las técnicas más recientes en el campo de la Gestión de la Demanda [6]. Su principal ventaja se aprecia en caso de que no se conozcan las leyes asociados al sistema modelado. Su desventaja, por su parte, se muestra ante el interés de estudiar la respuesta del sistema ante cambios de parámetros internos. Estudios preliminares han demostrado un horizonte prometedor en el uso de Redes Neuronales Artificiales (ANN - *Artificial Neural Networks*) mediante la función de transferencia *Tan-Sigmoid*. La referencia citada consta de tres capas cuyas entradas son los factores determinantes del consumo energético, esto es la edad de los habitantes de las casas, la cantidad de personas mayores a 60 años, la cantidad de adultos, la cantidad de niños entre 3 y 17 años, la cantidad de horas de ocupación de la casa, el ingreso económico del hogar, el área habitada, la tenencia de electrodomésticos, la ubicación geográfica y la temperatura externa como se muestra en la Figura 3.6. La salida corresponde al uso horario en función de estas variables. La información de entrada requerida en cada aspecto para un entrenamiento robusto debe tener una varianza adecuada, precisión y confiabilidad.

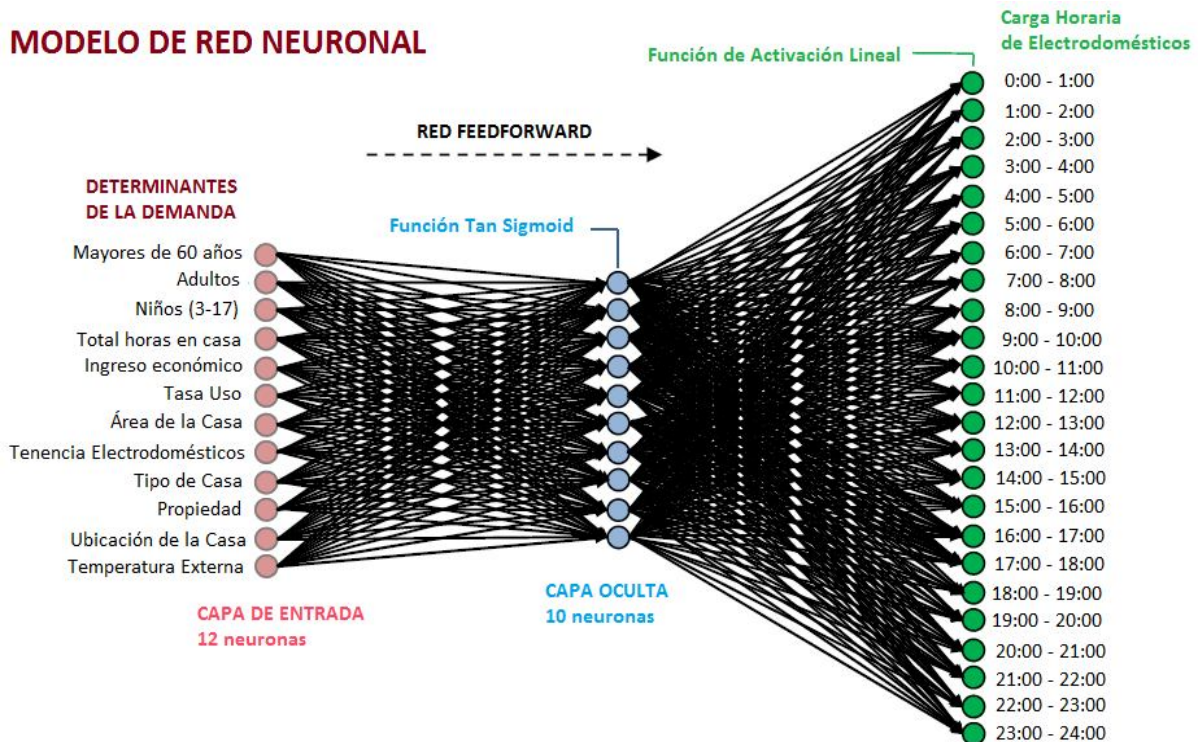


Figura 3.6: Red neuronal para el modelamiento de la carga eléctrica residencial.

Fuente AEIC.

Los diversos métodos disponibles comparten algunas características, sobre todo en algunos de los datos requeridos así como en las limitaciones metodológicas. La consideración o importancia de algunos factores determinantes dependerá en gran medida del objetivo de control de cada sistema. La coyuntura de cada país, la información disponible, las costumbres y desarrollo tecnológico harían que algunas estrategias de control de la demanda sean más atractivas que otras.

Por tanto, los escenarios planteados, los patrones determinantes, los tiempos y resolución necesarios, responderán a un análisis de requerimientos técnicos (a nivel de datos, herramientas, factores propios del sistema eléctrico regional/nacional) y factores coyunturales propios de cada país.

Existen además modelos econométricos para la estimación de la demanda residencial [6, 20, 21], y responden a la necesidad para la que fueron creados (análisis económicos de subsidios, por ejemplo) quedando fuera del alcance de esta tesis.

3.3. Información Estadística del Consumidor Residencial Peruano

La población del Perú se estima cerca de los 30 millones de habitantes, ubicados en 25 regiones con una extensión territorial de 1 285 215 km², y ha consumido el 2010 31798GWh de energía eléctrica, 9% mayor que la consumida el 2009; obteniendo un consumo per cápita por habitante promedio a nivel nacional de 1079kWh/ha

Se estima un crecimiento demográfico del 15% entre los años 2005 al 2030 (Fuente INEI), tal como se observa en la tabla 3.3. En el sector urbano se estima un crecimiento de la población del 3% en el mismo periodo, mientras que en la población rural decaería en un 20%. En ambos casos, se espera una reducción de aproximadamente 15% en la cantidad de habitantes por casa. Estos son factores importantes a considerar en las estimaciones de usabilidad eléctrica así como en las proyecciones de técnicas de eficiencia energética.

El número de usuarios llegó a los 5.17 millones, de los cuales Lima concentró 1.74 millones, seguido de Arequipa y La Libertad con más de 307 mil usuarios cada uno. Del total de usuarios, 89.6% se encuentra en el sector Residencial, 9.6% en el Comercial y el 0.8% en el sector Industrial. Las ventas anuales de energía eléctrica para el sector residencial el 2011 fue de 7719GWh (aproximadamente 992 Millones de dólares

americanos), que representa un incremento del 9% con respecto a la venta del 2010 y un incremento de 96% con respecto a la venta del 2000 [5]. El precio promedio para el consumidor residencial el 2011 fue de 12,8 US\$/kWh, el doble del precio promedio para el consumidor industrial (6.4 US\$/kWh) [5]. El precio de la energía eléctrica para el sector residencial se ha incrementado en aproximadamente 27% los últimos 10 años. En Lima, el consumo residencial representa el 43% de la venta de energía eléctrica como se muestra en la Figura 4.7, mientras que en el Callao, es el 34%. Lima además, concentra cerca del 40% del total de la venta de energía eléctrica del Perú, seguido de lejos por Arequipa y la Libertad (Fuente Osinergmin).

Tabla 3.3: Proyección de los factores demográficos 2010-2030. Fuente Perfil sociodemográfico del Perú SEIN-INEI.

| ITEM | Unidad | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|--------------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Población | [millón] | 28.424 | 29.788 | 31.218 | 32.716 | 34.287 |
| Tasa de crecimiento | [% p. a.] | 0.870 | 0.942 | 0.912 | 0.942 | 0.942 |
| Población urbana | [%] | 75.165 | 76.452 | 77.840 | 79.023 | 79.023 |
| Habitantes/casa | [cap] | 3.571 | 3.446 | 3.325 | 3.209 | 3.096 |
| Nº de viviendas | [millón] | 5.984 | 6.610 | 7.308 | 8.058 | 8.751 |
| Población rural | [%] | 24.835 | 23.548 | 22.160 | 20.977 | 20.977 |
| Habitantes/casa | [cap] | 4.074 | 3.952 | 3.833 | 3.718 | 3.607 |
| Nº de viviendas | [millón] | 1.733 | 1.775 | 1.805 | 1.846 | 1.994 |
| F. laboral potencial | [%] | 58.957 | 61.905 | 65.000 | 68.250 | 71.663 |
| F. laboral trabajando | [%] | 81.763 | 83.398 | 85.066 | 86.768 | 88.503 |
| F. laboral activa | [millón] | 13.702 | 15.379 | 17.261 | 19.374 | 21.746 |
| Población en grandes ciudades | [millón] | 12.982 | 13.810 | 14.690 | 15.626 | 16.621 |

** n.a. (no aplicable)

El mayor número de clientes en el mercado residencial peruano, se encuentra concentrado en los rangos más bajos de consumo, es decir, entre 0 y 30 kWh (35%) y entre 31 y 100 kWh (33%). Por el contrario, el número de clientes que consumen entre

301 y 500 kWh llega a tan sólo el 4% del total. Sin embargo, en cuanto a los ingresos generados, debe resaltarse que los clientes con consumos menores a 100kWh, que representan el 68% del total de la población, generan un ingreso del 25.4%; mientras que los clientes con más de 300 kWh, representan alrededor del 33.7% pese a que representan tan sólo el 7% de la población total [Fuente Osinergmin].

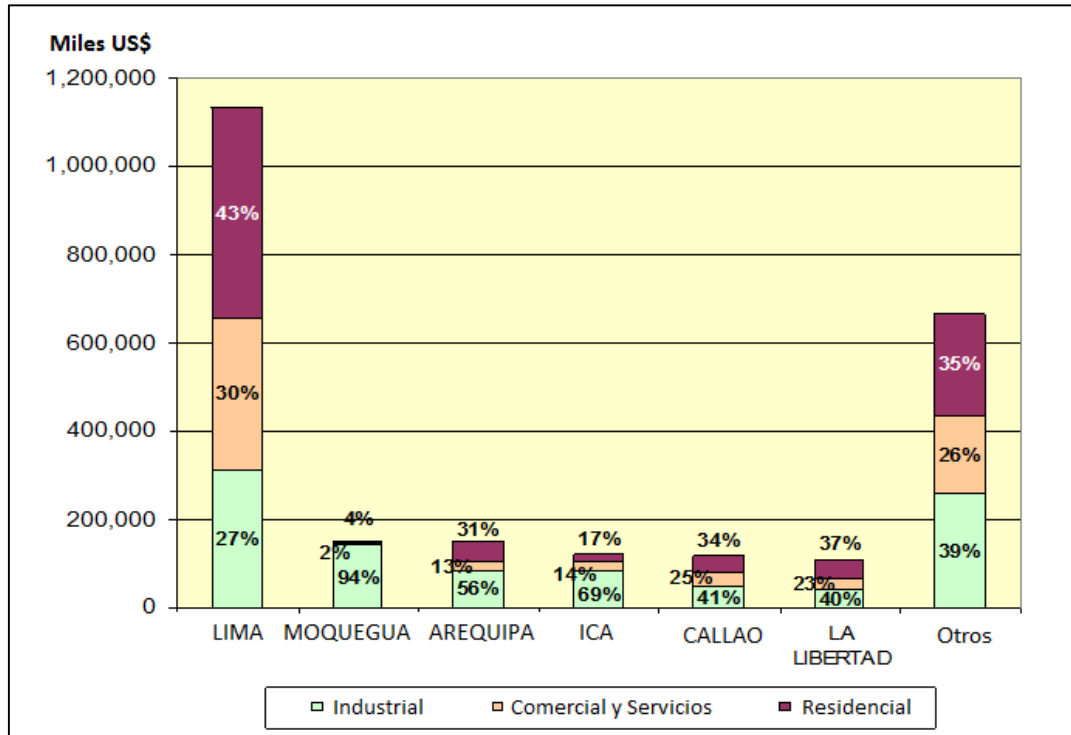


Figura 3.7: Facturación por venta de energía eléctrica por sectores 2011.

Fuente MEM.

Una característica adicional resaltante del consumidor residencial peruano, es el uso indefectible de la energía eléctrica en el hogar; siendo esta parte de la calefacción, el calentamiento de agua, la cocción, el aire acondicionado y los electrodomésticos. El sustituto también indefectible son los combustibles fósiles cuyo consumo se reduce drásticamente en consumidores urbanos – Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Uso final de energía en sector residencial.

Fuente. MAED-Ministerio de Energía y Minas.

| Formas de energía | Categoría de uso final | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Combustibles tradicionales | x | x | x | | |
| Electricidad | x | x | x | x | x |
| Solar, térmica | x | x | x | | |
| Combustibles fósiles | x | x | x | x | x |

1. Calefacción 4. Cocción 3. Electrodomésticos
 2. Calentamiento de agua 5. Aire Acondicionado

En el año 1995, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) inició la ronda de ejecución de la Encuesta Nacional de Hogares (ENAHOG) sobre condiciones de vida, tiene como objetivo medir las condiciones de vida de la población, y la estimación de la pobreza. Hasta el año 2002, esta encuesta se ejecutó en el IV trimestre de cada año, con cobertura nacional y con niveles de inferencia de los resultados para los siguientes dominios geográficos: Costa urbana, Costa rural, Sierra urbana, Sierra rural, Selva urbana, Selva rural y Lima Metropolitana. A partir del mes de mayo de 2003, la ENAHOG deja de lado el diseño de muestra del IV Trimestre y pasa a una encuesta continua con registro de información en las 52 semanas del año. La cobertura de la encuesta sigue siendo nacional y los niveles de conclusiones se obtienen por acumulación de muestra, lo que permite obtener información mensual. Los resultados trimestrales posibilitan inferencias para los dominios geográficos siguientes: Costa urbana, Costa rural, Sierra urbana, Sierra rural, Selva urbana, Selva rural y Lima Metropolitana. La base de datos anualizada permite inferencias a nivel de departamentos. Los resultados de estas encuestas permiten clasificar al consumidor residencial peruano en función a la tenencia de electrodomésticos de alta demanda energética, así como estimar su consumo en función a su permanencia en el hogar.

A nivel de departamentos, la tenencia de electrodomésticos de alto consumo energético varía significativamente. Información obtenida del INEI y del Ministerio de Energía y Minas, se muestra en la tabla 3.5. Lima y Callao concentran el mayor índice de tenencia con diferencias significativas con respecto a otros departamentos.

Tabla 3.5: Saturación (%) de bienes de consumo intensivo del hogar por departamentos. Fuente: Encuesta Residencial de Consumo y Usos de Energía 2007, ENAHO 2012.

| | Cocina Eléctrica | Lavadora Centrífuga | Lavadora Secadora | Terma Eléctrica | Microondas | Ducha Eléctrica |
|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Amazonas | 0.9 | 0.4 | - | - | 1.2 | - |
| Ancash | 0.5 | 4.5 | 0.5 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
| Apurímac | 0.6 | 0.9 | - | 0.6 | 0.6 | 0.4 |
| Arequipa | 4.2 | 8.3 | 0.2 | 7.3 | 5.8 | 8.2 |
| Ayacucho | 0.3 | 0.6 | - | 0.6 | 1.2 | 0.9 |
| Cajamarca | 0.4 | 0.9 | 0.4 | 0.8 | 0.9 | 0.9 |
| Callao | 4.9 | 19.4 | 2.8 | 2.8 | 12.5 | 3.6 |
| Cusco | 1.1 | 2.9 | 0.2 | 1.5 | 0.9 | 1.7 |
| Huancavelica | - | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| Huánuco | 0.5 | 0.8 | - | - | 0.3 | - |
| Ica | 0.5 | 3.1 | 0.3 | 0.8 | 1.3 | 1.0 |
| Junín | 2.8 | 0.7 | 0.2 | 4.2 | 4.2 | 3.2 |
| La Libertad | 1.9 | 6.8 | 1.1 | 2.0 | 2.4 | 2.7 |
| Lambayeque | 2.1 | 3.4 | - | 0.7 | 1.7 | 1.3 |
| Lima | 3.4 | 17.0 | 2.1 | 7.1 | 12.5 | 7.9 |
| Loreto | 0.3 | 1.5 | - | - | 2.6 | - |
| Madre de Dios | 0.3 | 1.6 | - | - | 0.3 | - |
| Moquegua | 3.8 | 6.8 | 1.9 | 1.1 | 2.2 | 1.3 |
| Pasco | 2.6 | 1.1 | - | 1.1 | 1.5 | 1.5 |
| Piura | 1.1 | 2.4 | 1.3 | 0.2 | 1.7 | 0.6 |
| Puno | - | 0.2 | - | 0.2 | 0.2 | 0.4 |
| San Martín | - | 4.7 | - | - | 1.2 | - |
| Tacna | 3.4 | 5.3 | 0.7 | 6.0 | 6.3 | 4.6 |
| Tumbes | 0.4 | 2.8 | 0.8 | 0.2 | 1.2 | 0.5 |
| Ucayali | 1.0 | 4.1 | - | - | 0.7 | - |
| TOTAL | 1.9 | 7.3 | 0.9 | 3.1 | 5.2 | 3.4 |

Capítulo IV

Programas de Control de la Demanda

Este capítulo introduce los principales conceptos, tipos y características de los programas de control de la demanda, a fin de cumplir los objetivos listados en el capítulo 2, y para los cuales fueron diseñados.

4.1. Principales Estrategias de Control de la Demanda

Son diversas las razones para implementar control de la demanda, ya sean estas parte de una estrategia reactiva de corto plazo, o proactiva de implementación duradera y efecto definitivo en la mejora del sistema eléctrico en el que es aplicado. Estos beneficios fueron revisados en el capítulo 2.

La experiencia internacional muestra resultados alentadoras con respecto al desarrollo de programas piloto, y pone en evidencia la relación entre ellos con la coyuntura tecnológica e idiosincrasia de cada país.

En el caso del Perú y su insipiente desarrollo en temas de control de la demanda, se plantea una estrategia inicialmente reactiva ante contingencias que podría ser prontamente extrapolada al control de horas pico diarios, de los que el consumidor residencial es el principal partícipe.

El sistema eléctrico está expuesto a contingencias de diferentes magnitudes y duraciones, cuya probabilidad se reduce exponencialmente con su magnitud [15], como se muestra en la figura 4.1.

El control DSM debe responder ante las contingencias sin que eso signifique una disminución significativa y/o prolongada del *confort* del usuario final y a su vez, optimizar el sistema eléctrico a corto y largo plazo, dentro de una estrategia global sustentada por políticas gubernamentales. La figura 4.2 muestra las respuestas esperadas de una estrategia de control DSM en función del tipo y horizonte del problema.

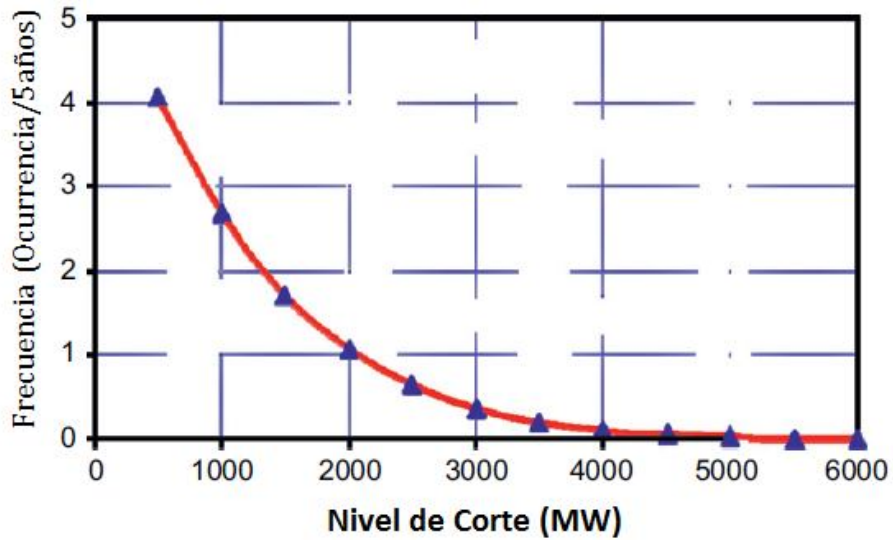


Figura 4.1: Frecuencia de Contingencias por magnitud. Fuente: *“Investigating the Impact of Demand Side Management on Residential Customers”*.

| | |
|--|--|
| Duración corta (Picos) | Desplazamiento de cargas |
| Duración media (Sequía) | Reducción prolongada de consumo en campañas |
| Duración larga (Recortes establecidos) | Reducción establecida de consumo, y cambio de combustible (gas, por ejemplo) |

Figura 4.2: Respuestas esperadas del DSM en función del tipo y horizonte del problema. Fuente: *“Primer on Demand-Side Management”*.

Los objetivos del control DSM dependerán de la estrategia global de la que formen parte, mostradas en la figura 2.2. Estos objetivos, como se menciona en 2.1.3, se clasifican en

1. Programas de corte de carga: Establecen un pago hacia el cliente a fin de que este reduzca su consumo eléctrico en los momentos críticos. Incluye clientes comerciales, industriales y residenciales.
2. Programas de precio dinámico: Brindan un incentivo de reducción de facturación al cliente, a fin de que este reduzca su consumo pico.

De acuerdo con [18], el mejor resultado con los programas DSM es mediante la combinación de los mismos; donde los programas de corte directo serían utilizados en las contingencias a fin de responder de manera previsible y simultánea ante las mismas.

Los programas de precio dinámico, serían utilizados para la optimización de la operación normal del sistema, mediante el incentivo al usuario final de desplazar sus cargas hacia momentos de menor precio, sin estar necesariamente en los momentos de precio pico.

- Programas de Corte de Carga Centralizado: Es aplicado mediante la desactivación/activación cíclica y remota por parte de la empresa de distribución, de los electrodomésticos de consumo eléctrico representativos, durante periodos relativamente cortos de tiempo. Los usuarios pueden manipular sus electrodomésticos normalmente cuando se encuentran fuera de los periodos de control y reciben una compensación, normalmente mediante reducción de su facturación eléctrica. La cantidad de veces y la duración de los cortes realizados están normalmente limitados en un contrato. La figura 4.3 muestra la representación esquemática de este tipo de programas.

Este tipo de programas es usualmente el utilizado para iniciar la implementación de estrategias DSM, ya que no depende sustancialmente de decisiones diarias voluntarias del consumidor, sólo de una motivación para la afiliación y permanencia en el sistema. Usualmente se toman estas experiencias como el soporte experimental cuyos resultados se muestran en campañas de marketing paralelas que permitan, luego de un lapso, la aplicación de programas de precio dinámico y/o la combinación de ambos.

- Programas de Precios Dinámicos: Los programas de precios dinámicos están diseñados para reducir los costos del sistema para las empresas distribuidoras y, simultáneamente, conseguir que la facturación hacia los clientes también se reduzca, mediante el incremento de los precios en horas caras y la reducción durante horas económicas. La curva de carga objetivo en este caso es la 'disminución de picos' y el 'desplazamiento de demanda', vistas en el capítulo 2. La empresa distribuidora es la principal responsable del diseño, implementación, evaluación y monitoreo del programa y en algunos casos, requieren de la instalación de equipamiento de control adicional y especializado para los usuarios finales, como por ejemplo, los termostatos inteligentes. Otros, como en el caso visto de Mercury, incluyen dispositivos disuasivos que indican visualmente los momentos

en los que el consumo eléctrico tiene un alto precio. A continuación se describen los cinco tipos de programas dinámicos DSM más comunes.

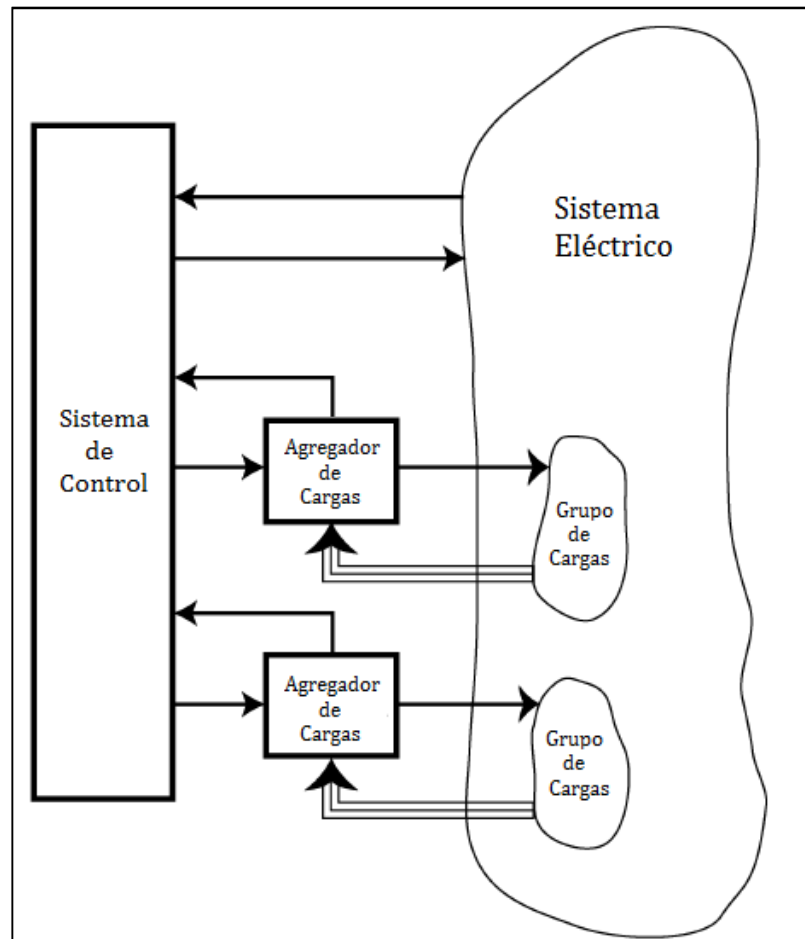


Figura 4.3: Representación esquemática de programas de corte de carga centralizado. Fuente: “Achieving Controllability of Electric Loads”.

1. Precio por Hora de Uso: TOU por sus siglas en inglés, *Time of Use Pricing*; este tipo de programa establece los precios en función del tiempo, siendo mayores en periodos pico y menores en periodos fuera del pico. Esta es la tarifación más simple e incluye sólo dos periodos para el establecimiento de los precios. Este tipo de programa es normalmente establecido en economías desarrolladas, como con la empresa *Electricite de France*, establecida para un total de 10 millones de usuarios, y ha sido obligatorio en California para todos los consumidores con por sobre los 500kW desde 1978, en respuesta ante la crisis de energía de 1973. En el Perú, la tarifación diferenciada por horarios punta es una clara aplicación de este tipo de sistema.

Cinco lecciones pueden derivarse de los programas TOU establecidos [3]. Primero, los clientes sí cambian su consumo como respuesta a los precios diferenciados, incluso cuando la variación de precio no es considerable. De acuerdo con un análisis independiente, los consumidores reducen su tiempo de consumo en el periodo pico en un 5% mensual consistente. Segundo, es importante manejar adecuadamente las expectativas del cliente con respecto a los ahorros generados, punto en el cual Perú tiene mucho por hacer dado que encuestas realizadas por la Pontificia Universidad Católica del Perú, muestran que más del 60% de la población peruana desconoce el horario establecido como hora punta, lo que impide primariamente la conducta reactiva esperada.

Tercero, los consumidores deben ser educados sobre la magnitud de ahorro que ellos pueden esperar en función de sus acciones de desplazamiento de cargas, es decir, de sus actividades. Una variedad de medios pueden ser usados para proveerles esta información, incluyendo cargas, una página *Web* (como la mostrada de *Mercury*) donde los usuarios pueden validar el resultado, en dinero, de su comportamiento energético. Cuarto, es deseable llevar a cabo un programa piloto inicial involucrando sólo algunos cientos de clientes antes de ofrecerlo en cantidades macro; con el fin de estimar con mayor exactitud los cambios esperados en la curva de la demanda. Quinto, y más importante, cualquier programa debe lograr ventajas para la mayoría de los consumidores o de lo contrario, no ofrecerse.

2. Precio por Pico Crítico: CPP por sus siglas en inglés, *Critical Peak Pricing*; esta tarifación cuenta con capas de picos críticos considerablemente mayores a la TOU. Este método es usado una cantidad máxima de días al año, en un momento no necesariamente notificado con días de anticipación. Este tipo de tarifación podría es normalmente complementaria a la TOU sobre la cual, se tienen periodos de mucho mayor precio en horas realmente críticas en las que se ve amenazada, por ejemplo, la estabilidad del sistema o si los precios, por condiciones ambientales extremas, se hubieran incrementado de manera significativa. En 1993, *Electricite de France* introdujo esta tarifación, contando actualmente con la afiliación de 120,000 consumidores residenciales. Este programa contempla el TOU tradicional con dos periodos de precios al día y tres tipos de días. El año es dividido en tres tipos de días, nombrados con los colores de la bandera francesa. Los días azules son 300 y por tanto, los más numerosos y menos costosos; los días blancos son 43 con precios medios; y los días rojos son 22 y tienen los precios más altos. La relación de precios entre los días azules fuera de pico y los días rojos en hora pico es aproximadamente de 15 en 1. Este programa es denominado *Tempo* e informa a

los usuarios del tipo de días mediante una página Web (<http://www.tempo.tm.fr>) o mediante suscripciones telefónicas.

3. Precio por Día Extremo: EDP por sus siglas en inglés, *Extreme Day Pricing*; es un sistema similar al CPP, excepto que el precio más alto hace efecto para las 24 horas de un máximo número de días críticos, cuya ocurrencia es desconocida hasta con un día de anticipación.

4. Precio por Día Extremo CPP: ED-CPP por sus siglas en inglés, *Extreme Day CPP*; es una variación del CPP en el cual el precio pico crítico y el correspondiente precio no pico crítico, son aplicados a las horas de los días extremos únicamente. Para el resto de los días no existe tarifación TOU alguna.

5. Precio en Tiempo Real: RTP por sus siglas en inglés, *Real Time Pricing*; permite la visualización en tiempo real de los precios a lo largo del día. Un ejemplo real de este tipo de tarifación es el de *Chicago Community Energy Cooperative Co-op*, establecido para clientes residenciales, junto con la empresa de distribución local, *CommEd*. La empresa de distribución provee el sistema de medición y facturación, mientras que *Co-op* le provee al cliente las notificaciones (vía Web, correo electrónico y teléfono) y las herramientas educativas y de manejo energético.

El análisis de las cargas del consumidor durante el primer año indicó que los participantes respondían ante el aumento de precios en los periodos pico, con una elasticidad de -0.042 sobre el rango total de precios. Más de la mitad de los participantes mostraron una respuesta significativa ante las notificaciones de incremento de precios logrando que la reducción de la demanda agregada fuera de un 25%. Más del 80% de participantes reportaron la modificación de sus patrones de consumo. La satisfacción del cliente fue muy alta con el programa. El programa fue considerado 'fácil y sencillo' para el 82% de los participantes y 'difícil y demandante de tiempo' para el 1%. Los participantes ahorraron en promedio \$12 por mes, lo que equivale a un 20% de su consumo mensual.

Este proyecto ha mostrado que los consumidores residenciales son un mercado viable para un RTP (3). Ellos representan un mercado clave, desde que el consumidor residencial es el mayor contribuyente al pico del sistema. Con un programa eficiente de concientización y educación poblacional, la tecnología de soporte adecuada (tanto para la

notificación como para la toma de acción) sería posible obtener los mejores resultados en la obtención de la curva de la demanda deseada.

4.1.1. Respuesta del Consumidor a los Programas de Precio Dinámicos: Como ya se mencionó, uno de los factores claves para lograr la eficiencia económica de los programas de precios dinámicos es la respuesta de los consumidores a la misma. Esta puede ser expresada como el cambio de la curva de la carga del cliente a lo largo de las 24 horas de un día pico. Analíticamente, es muy útil descomponer este cambio en la curva de la carga en dos efectos. El primer efecto es un cambio puro de la forma, con el consumo de energía durante el día representada por el área bajo la curva, manteniéndola constante. Esta crece con la decisión del cliente de sustituir el consumo de electricidad de bajo costo por consumos de alto costo. El segundo efecto es un cambio en el nivel de consumo, el cual crece con la decisión del cliente de reducir o incrementar su consumo eléctrico en conjunto en función del incremento o caída del precio. Ambos efectos son medidos en términos de elasticidad, elasticidad por sustitución y elasticidad al precio, correspondientemente. Ambas elasticidades son negativas y usualmente muy bajas en valor pero en presencia de precios significativamente mayores durante periodos pico en días seleccionados, pueden producir reducciones significativas en el consumo de energía pico.

Para la estimación del potencial de los programas DSM se plantean diversos tipos de escenarios basados en implementación de tecnología y aceptación por el usuario. Estos escenarios son presentados en [3] y se utilizaron para estimar la respuesta de la demanda de Estados Unidos en un horizonte de 10 años:

- Escenario Negocio Tradicional: Este escenario considera la respuesta de la demanda que se obtendría si no se realizaran cambios en el sistema durante 10 años. En analogía nacional, equivale a aplicar la tarifación por bloques y los contratos con los consumidores industriales y comerciales de gran envergadura.
- Escenario Negocio Tradicional Expandido: Este escenario considera las condiciones del escenario negocio tradicional con los siguientes adicionales:
 1. Las políticas actuales se aplican a nivel nacional y/o se incrementa la participación.
 2. Se implementa parcialmente la instalación de medidores avanzados.
 3. Se dispone de un pequeño grupo de clientes (5%) con programas de precio dinámico a elección.

- Escenario de Participación Alcanzable: En este escenario se estima la respuesta de la demanda si:
 1. Se implementa totalmente la instalación de medidores avanzados.
 2. La tarificación por precios dinámicos es por defecto.
 3. Otros programas de respuesta de la demanda estarían disponibles en 10 años.
Se asume además que el 75% de los clientes se mantienen en tarificación dinámica y el resto en algún otro tipo de programa de respuesta de la demanda; y que el 60% de la población utilizaría la tecnología necesaria (como termostatos inteligentes)
- Escenario de Participación Total: Este escenario calcula la respuesta de la demanda si todos los usuarios utilizan de manera eficiente la tecnología necesaria, además de las consideraciones del escenario anterior.

Con estos escenarios como base, sería posible estimar la respuesta de la demanda en una región y gradualmente, establecer las acciones correctivas necesarias.

4.1.2. Factor de Coincidencia: Un factor clave de la demanda es la diversidad en el uso y horarios de los electrodomésticos, lo que es ampliamente explotado en el diseño y operación de los sistemas de distribución. La capacidad de un sistema de distribución eléctrico para abastecer varios miles de hogares sería aproximadamente sólo el 10% de la capacidad total que sería requerida si cada hogar individualmente consumiera el máximo todo el tiempo [15]. Precisamente las redes de distribución eléctrica se benefician de esta característica conocida como factor de coincidencia. Este factor está definido por el cociente entre el consumo eléctrico máximo en un instante de toda la población sobre el consumo eléctrico total de los máximos de toda la población considerada [14]. El factor de coincidencia permite evaluar la coincidencia de las cargas pico y está definido en la ecuación 4.1:

$$fc = \max_{t \in [1, T]} \frac{[\sum_{i=1}^n (D_{it})]}{\sum_{i=1}^n \max_{t \in [1, T]} (D_{it})} \quad (4.1)$$

Donde:

- fc : Factor de coincidencia.
- D_{it} : Carga del consumidor i en el instante t
- n : Cantidad de usuarios.

- T: Total de periodos utilizados para la toma de datos.

El factor de coincidencia es por tanto, el ratio entre la máxima demanda total coincidente de un grupo de casas y la suma de las máximas demandas individuales en un momento determinado. Tiene un valor máximo de 1, en el cual las máximas cargas de cada consumidor ocurren juntas. Las empresas de distribución aprovechan esta característica de diversidad de cargas; sin embargo, tiene un límite ya que no se conseguirán ganancias significativas en la capacidad del sistema al incrementar sobre un valor determinado, el número de casas. Este fenómeno se observa en la figura 4.4, que muestra como el factor de coincidencia cambia con el número de hogares.

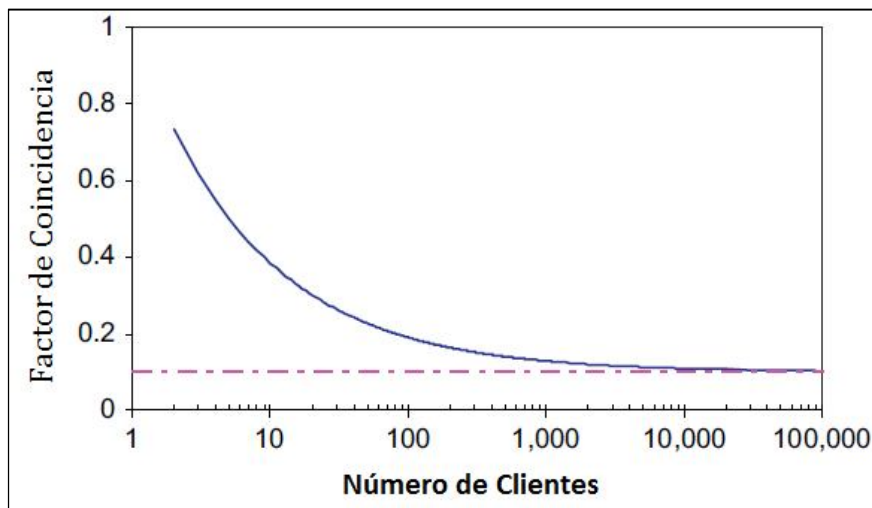


Figura 4.4: Factor de coincidencia en función del número de casas. Fuente: *"Investigating the Impact of Demand Side Management on Residential Customers"*.

El control pretende reducir el factor de coincidencia ante contingencias y a mediano plazo, balancear el uso de las cargas durante el día.

Capítulo V

Resultados

Los resultados del desarrollo de esta tesis son mostrados en el presente capítulo.

5.1. Descripción de la Aplicación

Este trabajo busca el análisis de la aplicación hipotética de un programa de control directo de cargas sobre un grupo objetivo de consumidores eléctricos peruanos; para mejorar la respuesta ante contingencias del sistema en el que se encuentran inmersos. El grupo considerado contiene una población de 10000 personas, dentro de las cuales, se clasifican los consumidores como atractivos o no, para ser partícipes del control. La aplicación asume una aceptación total o algún tipo de imposición legal, bajo la cual, el cumplimiento de ciertas características definen por defecto si un usuario determinado formará parte del programa. Aunque no es un requerimiento impuesto por la aplicación en sí, el desarrollo conlleva a una elección natural basada únicamente en el SEIN.

Con el modelamiento propuesto para todos los perfiles definidos se calcula el factor de coincidencia para utilizarlo como referencia del desempeño del control.

El sistema modelado se expone a contingencias de diferentes envergaduras y duraciones, con las cuales se aplica una estrategia de control directo de cargas centralizado con histéresis y se analiza, primero, la variación del factor de coincidencia y segundo, el efecto sobre el *confort* de los usuarios *target* ante la contingencia. Las simulaciones se desarrollan con el *software* MATLAB. Todas las simulaciones consideran intervalos de tiempo modificables de 15 minutos.

Este trabajo presenta algunas limitaciones metodológicas, sobre todo en lo referente a la información disponible. La principal fuente de datos históricos considerada para el desarrollo de esta tesis, son las encuestas ENAHO llevadas a cabo por el INEI en hogares distribuidos en todo el territorio nacional.

5.2. Modelo Propuesto

El modelo propuesto en este trabajo sirve como entrada para la estrategia de control de la demanda. Este control, como se verá más adelante, requiere conocer el comportamiento eléctrico individual de los componentes de cada subsistema en el tiempo. Los parámetros de desempeño del control recaen en el impacto sobre el *comfort* del cliente (cuyas variables se verán el apartado siguiente) y en la reducción del factor de coincidencia conseguido ante contingencias de diferentes magnitudes y duraciones.

El modelo utilizado es una variante del Método Simple para la Formulación de la Curva de Carga descrito en el capítulo 3. Las variantes responden a las diferencias en la consideración y estimación de los factores determinantes que rigen el comportamiento energético residencial, i.e. los conductuales y físicos.

Los factores determinantes en la influencia de la curva de la demanda residencial considerados en este trabajo son:

- a. Patrones geográficos.
- b. Patrones de tenencia de electrodomésticos.
- c. Patrones de permanencia en el hogar.
- d. Patrones de utilización de electrodomésticos.
- e. Patrones climáticos.

Los patrones socioeconómicos y culturales no se consideran de forma explícita aunque están correlacionados con la tenencia y utilización de los electrodomésticos.

En esta tesis se insiste en un enfoque promedio por diversos factores, entre ellos, el más importante, la falta de información. Las encuestas no acumulan los datos necesarios para formular una relación viable entre estas variables (nivel socioeconómico y cultural). Segundo, aunque existe una correlación entre la tenencia de equipos y el ingreso económico del hogar, esta información podría incidir indirectamente en la eliminación de público objetivo deseable, ya que estudios diversos evidencian que los hogares de menos recursos económicos son consumidores más elásticos y por tanto, reaccionan al cambio de precio como se espera lograr en el programa. Esta información podría ser validada también en futuros estudios y con encuestas directamente relacionadas a los patrones de consumo específicos en los hogares a fin de hallar patrones que permitan un enfoque más 'empático' del programa. Por último, la cantidad de personas en el hogar naturalmente influye también en el consumo eléctricos, sin embargo, este no será un determinante para la clasificación del público objetivo ya que existe un decremento significativo en la cantidad promedio de personas en un hogar, haciéndose cada vez más

presentes los hogares con una sola persona o parejas sin hijos. Este sin embargo, no determina necesariamente la vacancia del hogar, puesto que muchas de estas personas contratan servicio doméstico por días.

En resumen, se considera relevante y preciso (por la información disponible) tomar en cuenta únicamente los patrones listados.

La estimación de la influencia de los patrones en este trabajo, se describe a continuación:

- **Patrones Geográficos:** Este patrón 'filtro', particular del objetivo de control, busca la ubicación geográfica del público *target* con fines de optimizar los recursos necesarios para la implementación. Las preguntas que surgen son: ¿dónde se encuentra la mayor concentración de utilización residencial?, ¿qué electrodomésticos y/o cargas eléctricas en general son las de mayor consumo energético?, ¿cuáles son las cargas que influyen de manera moderada la comodidad del usuario?, ¿qué porcentaje y quienes son las personas que tienen estos electrodomésticos?, ¿los grupos identificados comparten similares condiciones climáticas? Con esto, se hace necesario revisar la información estadística regional o distribuida geográficamente en cuanto a consumo energético residencial. De acuerdo con la información presentada en la figura 4.7, la mayor concentración de venta eléctrica se encuentra en Lima, con un ascendente de \$1,150 millones, de los cuales, el 43% representa el consumo residencial; seguidas de lejos por Arequipa cuyo venta eléctrica no supera los \$200 millones y de los cuales el consumo residencial sólo representa el 31%. Esta concentración no sólo se debe a la mayor densidad poblacional sino que se ve incrementada con la mayor cantidad de electrodomésticos de alto consumo energético, como indica la tabla 4.5.

En resumen, dado que la ubicación geográfica posibilita el uso de mercados de escala a niveles de transmisión de datos y de acuerdo a la información estadística, la mayor cantidad de consumidores se encuentran en Lima, además de ser los que mayor demanda de cargas especiales y de uso intensivo de energía tienen, como se ve en el siguiente apartado. Por lo tanto, el modelo propuesto se centrará únicamente para la población de Lima, específicamente Lima Metropolitana que, en términos generales, está sujeta a las mismas estaciones climáticas.

- **Patrones de Tenencia de Electrodomésticos:** En el capítulo 4 se identificaron 3 tipos de cargas; las cargas base, las cargas de uso intensivo de energía (CUIE) y las cargas especiales (CE).

Para incrementar el efecto del control directo de cargas centralizado, los electrodomésticos considerados en las acciones de control, deberán ser los de mayor consumo eléctrico y, a su vez, de menor impacto sobre el *comfort* del usuario final. Bajo esta premisa, las cargas base, por su naturaleza (relativo bajo consumo y alto impacto en el usuario final) no serán consideradas como relevantes en el modelamiento. La corrección a este modelo considerando este tipo de cargas, sería una oportunidad de mejora del presente trabajo a fin de representar, de manera más precisa, el comportamiento eléctrico total del consumidor residencial.

De acuerdo con la información presentada en [20], [41] y [42], las cargas de más demanda energética y presencia en Lima son, en orden de consumo:

- Aire Acondicionado (8200) – 12,5% - NO DHW.
- Cocina eléctrica (4500W) - 3,4% - NO DHW.
- Ducha eléctrica (3500W) - 14,7% - DHW.
- Lavadora secadora (2200W) - 2,1% - DHW.
- Terma eléctrica (1500W) - 7.1% - DHW.
- Horno microondas (1100W) - 12.5% - NO DHW.
- Lavadora centrífuga (800W) – 17,0% - NO DHW.

El porcentaje de tenencia a nivel de Lima, mostrado en la tabla 3.5, es listado también para cada carga; así como la indicación de si se tratan de electrodomésticos consumidores de agua caliente, o tipo DHW.

Todas las cargas listadas, con excepción del aire acondicionado que es una carga tipo CE; pertenecen, por sus características, a la categoría CUIE. Los consumos eléctricos mostrados, son los valores promedios de uso a lo largo del año en Lima Metropolitana. Al evaluar los patrones y escenarios para agregar las cargas, se consideran también los aspectos climáticos que influyen en el consumo eléctrico de este grupo de electrodomésticos que utilizan agua caliente y que son conocidos como DHW. El consumo energético cálculos estarán basados en las ecuaciones 3.4 y 3.5.

Los valores de temperatura ambiente y deseada serán limitados en función de la estación climática considerada para la simulación.

Para cumplir con la optimización de recursos utilizados en la implementación del programa propuesto, se considerarán tres tipos de consumidores (TC):

1. Consumidores TC1 con al menos una carga especial. La tenencia de artefactos CUIE mejoraría el atractivo de este usuario. Este usuario sería tomado en cuenta dentro del programa.
2. Consumidores TC2 con al menos dos cargas CUIE. Este usuario sería tomado en cuenta dentro del programa.
3. Consumidores TC3 que no tienen dos cargas CUIE ni cargas especiales. Estos usuarios no son considerados en el programa por no representar una opción económicamente atractiva para la implementación del programa.

El consumidor residencial objetivo para este trabajo pertenece **únicamente** a los tipos TC1 y TC2, y se muestra en la figura 5.1.

Dado que la tenencia por sí sola no define el consumo energético residencial, se toman en cuenta los factores de utilización de los mismos como los periodos en los que el uso sería posible.

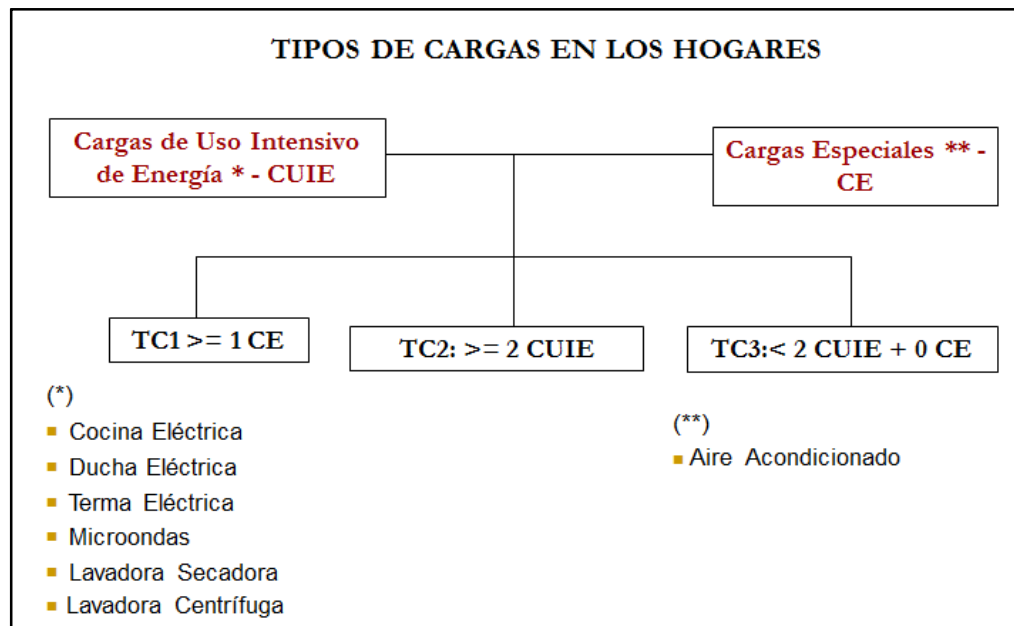


Figura 5.1: Clasificación del público objetivo por tenencia de cargas eléctricas.

Fuente: Elaboración Propia.

- **Patrones de Permanencia en el Hogar:** Para incluir el factor de este patrón, es necesario identificar los escenarios más importantes de permanencia en el hogar limeño;

tomando en cuenta que estos se ven influenciados por la cantidad de personas de cada hogar. De acuerdo con la tabla 3.3; el promedio de personas en una vivienda urbana (Lima Metropolitana) es de 3.5 aproximadamente, para el 2013; con una disminución constante hasta el 2030, donde se estima un promedio de 3.096 personas. Este valor será considerado para todos los supuestos y promedios establecidos en el desarrollo del modelo.

De acuerdo con la información presentada en la ENAHO 2012 (<http://www.inei.gob.pe/web/enaho/>) referente a los datos de ocupación (trabajo, estudio); se estiman indirectamente los tiempos en los que la casa está ocupada a lo largo del día. Con esto, las características de los escenarios de permanencia en una casa limeña de 3 personas, son mostradas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Escenarios de Permanencia en Hogares Limeños.

| Escenario | | % Población Limeña |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| Escenario 1 | Periodo desocupado de 9 a.m. a 6 p.m. | 36% |
| Escenario 2 | Periodo desocupado de 9 a.m. a 1 p.m. | 13% |
| Escenario 3 | Periodo desocupado de 1 p.m. a 6 p.m. | 8% |
| Escenario 4 | Casa ocupada todo el tiempo | 43% |

Las consideraciones tomadas al respecto, para el modelamiento son:

- Los días laborables son de lunes a viernes y los días no laborables son sábados, domingos y feriados.
- Los porcentajes de los escenarios son válidos únicamente para los días laborables.
- Por fines prácticos, los días no laborables contemplan una población del 100% en el escenario 4.
- En la elaboración de los escenarios se toma en cuenta la población que contrata servicios domésticos (y por tanto, cuenta como un periodo de permanencia de día completo). No se considera la frecuencia de contratación, y se incluye en todos los días laborables.
- El horario de trabajo considerado para toda la población es de 6:00 a.m. a 11:00p.m.
- Se considera que los electrodomésticos son utilizados únicamente en el periodo de permanencia en la casa. No se contempla las programaciones horarias para encendidos en diversos horarios.

- **Patrones de Utilización de Electrodomésticos:** Existe muy poca información de los patrones de uso para los electrodomésticos con respecto al momento en el que estos son utilizados, pero sí existe información en cuanto a las horas al día y a los días al mes que en promedio son utilizados. La tabla 5.2 muestra la cantidad de días y horas de consumo de los electrodomésticos de nuestro interés por hogar de 3 ocupantes [41]. Esta información fue presentada por el MEM con información proporcionada por CENERGIA.

A la fecha, no se han llevado a cabo encuestas o monitoreos para conocer los hábitos directos de consumo eléctrico como la concientización energética, la consideración de potencia *stand-by*, la repartición de cargas, la utilización de electricidad por tipo de miembro familiar, la programación de electrodomésticos para encendidos por horarios, etc., por lo que los valores considerados serán tomados como referencia promedio y con fines prácticos, estos valores se considerarán fijos para el cálculo de probabilidad de uso diario/horario dentro de los perfiles climáticos identificados en el siguiente apartado.

Dado que los patrones de uso de los electrodomésticos están relacionados con los diferentes niveles culturales de la población y su conocimiento/actitudes hacia las acciones energéticamente eficientes, se presenta una alerta puesto que los consumidores están informados de manera deficiente con respecto a los consumos energéticos de sus electrodomésticos y por tanto, no cuentan con las herramientas necesarias para optimizarlos.

Tabla 5.2: Tiempos de uso de principales consumidores eléctricos residenciales.

| Equipos | Estación Fría | | Estación Cálida | |
|---------------------|---------------|------------|-----------------|------------|
| | Horas / día | Días / mes | Horas / día | Días / mes |
| Aire Acondicionado | 2 | 12 | 3 | 16 |
| Cocina Eléctrica | 3.75 | 29 | 3.75 | 29 |
| Ducha Eléctrica | 4 | 25 | 4 | 25 |
| Lavadora Secadora | 2 | 4 | 2 | 3 |
| Terma Eléctrica | 4 | 26 | 4 | 26 |
| Horno Microondas | 0.25 | 26 | 0.25 | 26 |
| Lavadora Centrífuga | 2 | 4 | 2 | 4 |

En cuanto a la distribución horaria del uso de los electrodomésticos, se utiliza la información de [16], recopilada mensualmente entre los consumidores residenciales del Ecuador, entre los años 2008 y 2011. La información sirve como guía básica para las estimaciones de la distribución energética de las principales actividades residenciales, y se muestra en la figura 5.2.

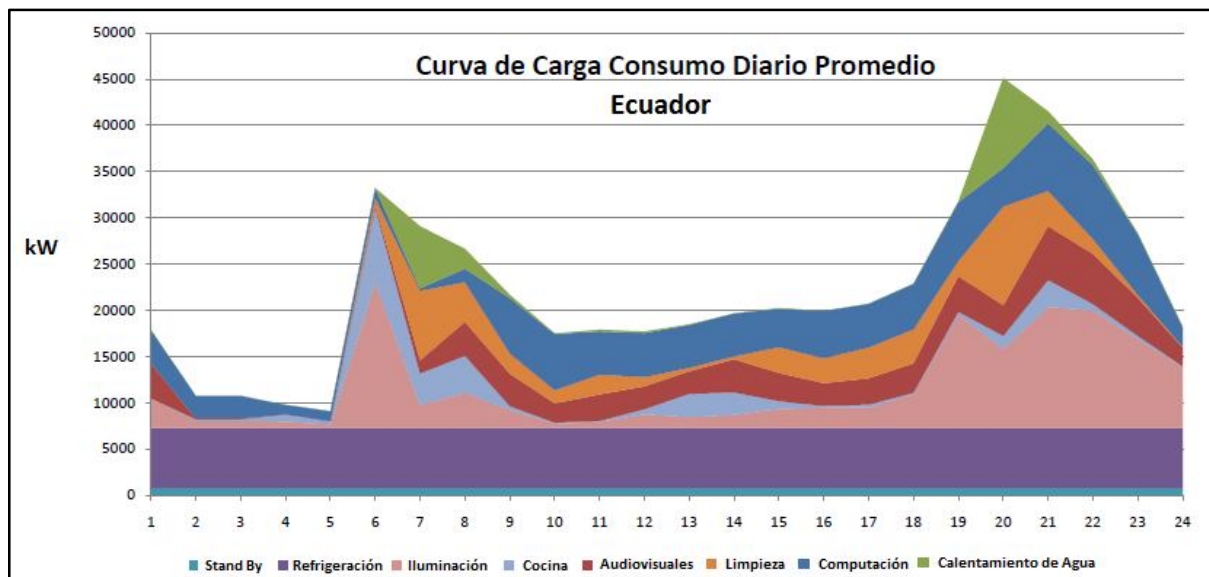


Figura 5.2: Distribución horaria de las curvas de cargas residenciales en Ecuador. Fuente: “Análisis de los Hábitos de Consumo, CENTROSUR”.

Los datos mostrados en la figura servirán como patrón de distribución en esta tesis, tomando en cuenta condiciones socioeconómicas y culturales similares.

Las consideraciones tomadas al respecto, para el modelamiento son:

- Distribución promedio de las cargas de limpieza uniforme a lo largo del día, con aportes equitativos en los picos de la mañana y la tarde/noche.
- Aporte equitativo de los picos energéticos de las cargas de calentamiento de agua.
- Incremento de cerca del 25% en el aporte al pico de la noche con respecto al de la mañana en las cargas de cocina.
- Las demás cargas no son de interés para el desarrollo de esta tesis.

Estas consideraciones se observan gráficamente en la figura 5.3.

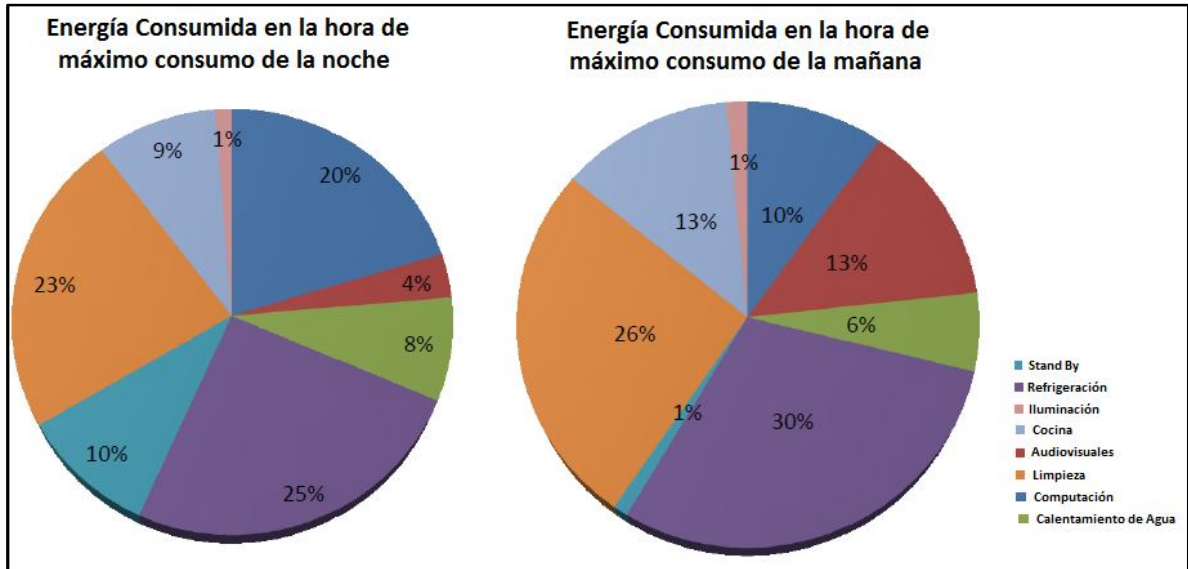


Figura 5.3: Aportes de las cargas en las horas de máxima demanda. Fuente: “Análisis de los Hábitos de Consumo, CENTROSUR”.

- Patrones Climáticos:** La demanda eléctrica depende de la estación del año ya que el consumo de los electrodomésticos tipo DHW y del aire acondicionado, tiene una dependencia directa con la temperatura ambiente y con la temperatura deseada que a su vez, tienen dependencia directa con la estación del año.

De acuerdo con la selección de patrones geográficos, la ubicación del público *target* es Lima Metropolitana, donde las estaciones climáticas no son extremas, por lo que es posible dividir las estaciones climáticas en dos grupos: Estaciones frías (invierno, otoño) y estaciones cálidas (verano, primavera); utilizadas ya en la elaboración de la tabla 5.2.

A fin de estimar los consumos en los tiempos, se utilizan en las estimaciones, las ecuaciones (3.4) y (3.5) para el aire acondicionado y los electrodomésticos DHW, respectivamente:

Aire Acondicionado:

$$E_A = U_A(T_A - T_O) + H_M(T_A - T_M) + C_A \frac{\Delta T_A}{\Delta T}$$

Electrodomésticos DHW:

$$E_{hw} = \frac{C_p \rho V (T_{out} - T_{in})}{3600}$$

Las consideraciones tomadas al respecto, para el modelamiento son:

- Los cálculos se realizan en base a periodos de 15 minutos y no se consideran los efectos transitorios de arranque de las cargas.
- Los valores de temperatura ambiente (T_A) y de temperatura del aire exterior (T_O) de la ecuación (4.4), se consideran aleatoriamente dentro de un conjunto de valores posibles para cada estación. Estos valores se muestran en la tabla 5.3:

Tabla 5.3: Rango de temperaturas para aire acondicionado por estación.

| Parámetros | Estación | Rango de Temperaturas |
|------------|-----------------|---|
| T_A | Estación Fría | $T_A \in [14,17] \text{ }^\circ\text{C}$ |
| T_O | | $T_O \in [12,16] \text{ }^\circ\text{C}$ |
| T_A | Estación Cálida | $T_A \in [18, 28] \text{ }^\circ\text{C}$ |
| T_O | | $T_O \in [16, 25] \text{ }^\circ\text{C}$ |

- Los valores de conductancia térmica equivalente de la casa (U_A), la conductancia de la masa sólida interior de la habitación (H_M) y la masa del aire (C_A) de la ecuación (3.4), dependen de las características de la casa, definidos aleatoriamente para cada usuario dentro de un conjunto de valores posibles para las características limeñas de las viviendas. Estos valores se muestran en la tabla 5.4:

Tabla 5.4: Rango de parámetros para aire acondicionado.

| Parámetros | Rango | Consideraciones |
|------------|--|---|
| UA | $U_A \in [0.82; 1.35] \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ | Diferentes tipos de ladrillo |
| HM | $H_M \in [1.35, 2.09] \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ | Materiales de tabiquería a mármol |
| CA | $C_A \in [12, 18] \text{ Kg}$ | Habitaciones de 10m^3 a 15m^3 |

- Los valores de temperatura de salida (T_{out}) y de temperatura entrada (T_{in}), de la ecuación (3.5) se consideran aleatoriamente dentro de un conjunto de valores posibles para cada estación. Estos valores se muestran en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Rango de parámetros para electrodomésticos DHW

| Parámetros | Estación | Rango de Temperaturas |
|------------------------|-----------------|------------------------|
| Tout Ducha Eléctrica | Estación Fría | Tout \in [26,35] °C |
| Tout Terma Eléctrica | | Tout \in [25,45] °C |
| Tout Lavadora Secadora | | Tout \in [26,35] °C |
| Tin | | Tin \in [12,16] °C |
| Tout Ducha Eléctrica | Estación Cálida | Tout \in [16, 21] °C |
| Tout Terma Eléctrica | | Tout \in [16, 21] °C |
| Tout Lavadora Secadora | | Tout \in [25,45] °C |
| Tin | | Tin \in [16,22] °C |

- Los valores del calor específico del agua (C_p), la densidad del agua (ρ) se consideran fijos y se muestran en la tabla 5.6:

Tabla 5.6: Valor de los parámetros para electrodomésticos DHW.

| Parámetros | Valor |
|------------|-----------------------|
| C_p | 4.187 kJ/kg K |
| ρ | 1000kg/m ³ |

- Los volúmenes diarios de agua caliente consumidos por una casa de 3 personas para el Reino Unido es presentado en [31] y utilizado como referencia en esta tesis. Los valores son mostrados en la tabla 5.7:

Tabla 5.7: Volúmenes diarios de consumo de agua de electrodomésticos DHW.

| Electrodoméstico | Volumen diario de agua caliente / casa |
|-------------------|--|
| Ducha Eléctrica | 31,8 litros |
| Terma Eléctrica | 31,8 litros |
| Lavadora Secadora | 35,1 litros |

Los valores, consideraciones y supuestos son tomados en cuenta para el modelamiento del consumo residencial. El agrupamiento de los patrones para el modelamiento, se muestra en la figura 5.4.

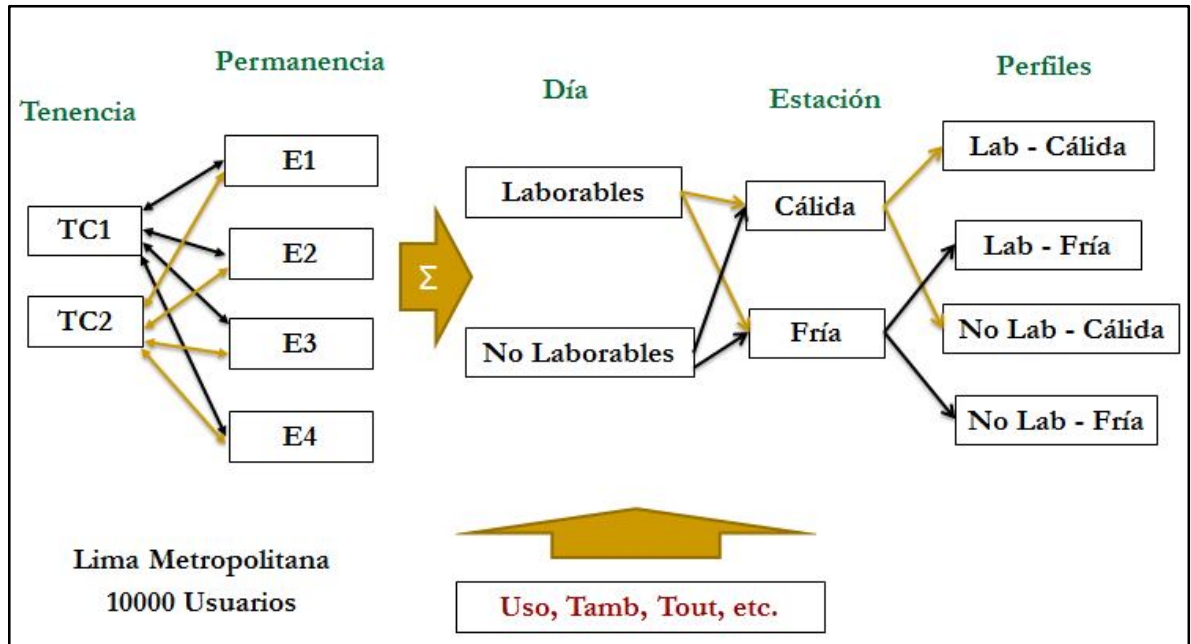


Figura 5.4: Agrupamiento de patrones para modelamiento del consumidor residencial. Fuente: Elaboración Propia.

Los diagramas de flujo correspondientes, se muestran en las figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10.

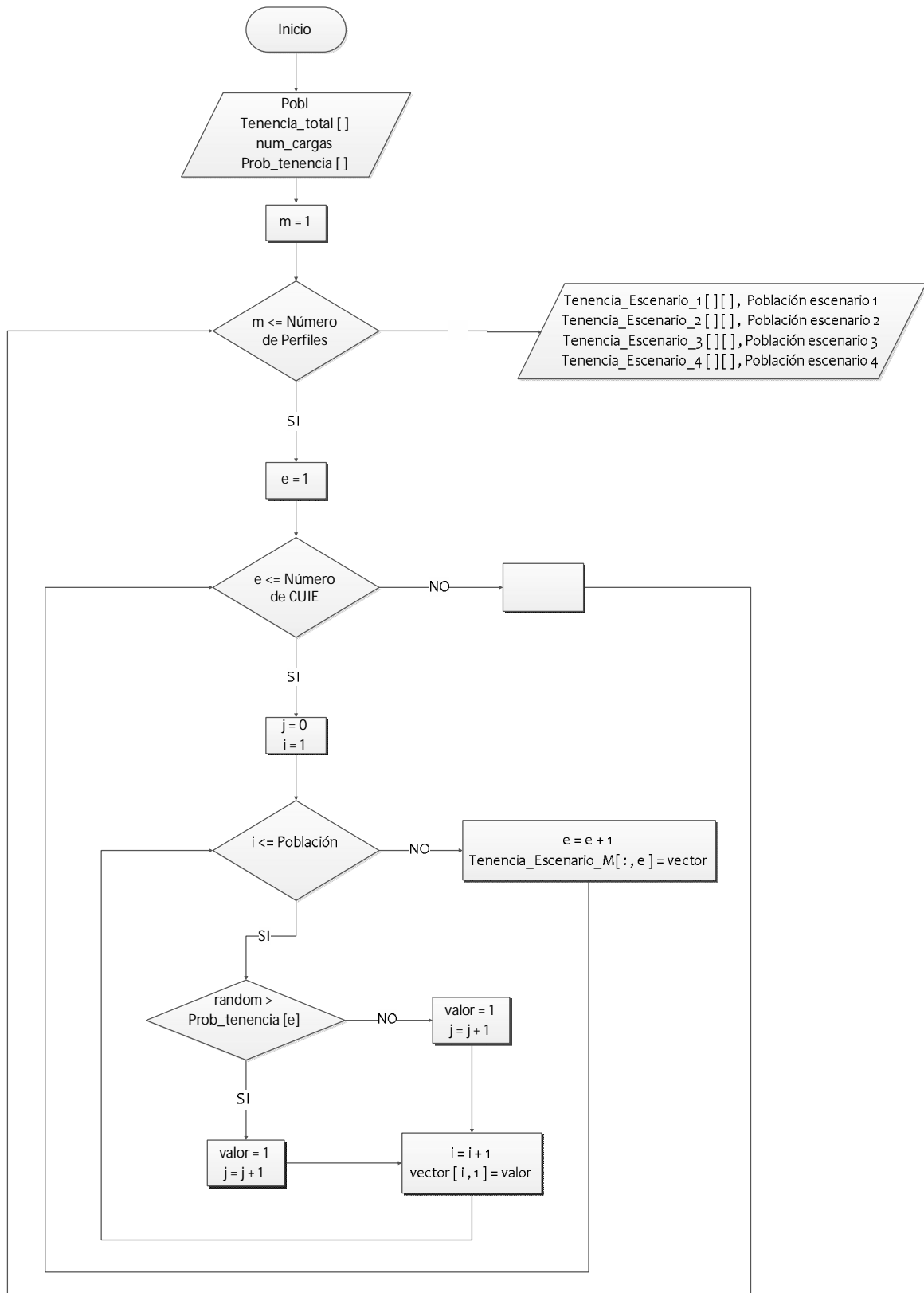


Figura 5.5: Diagrama de flujo de tenencia y pertenencia a escenario – Día Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

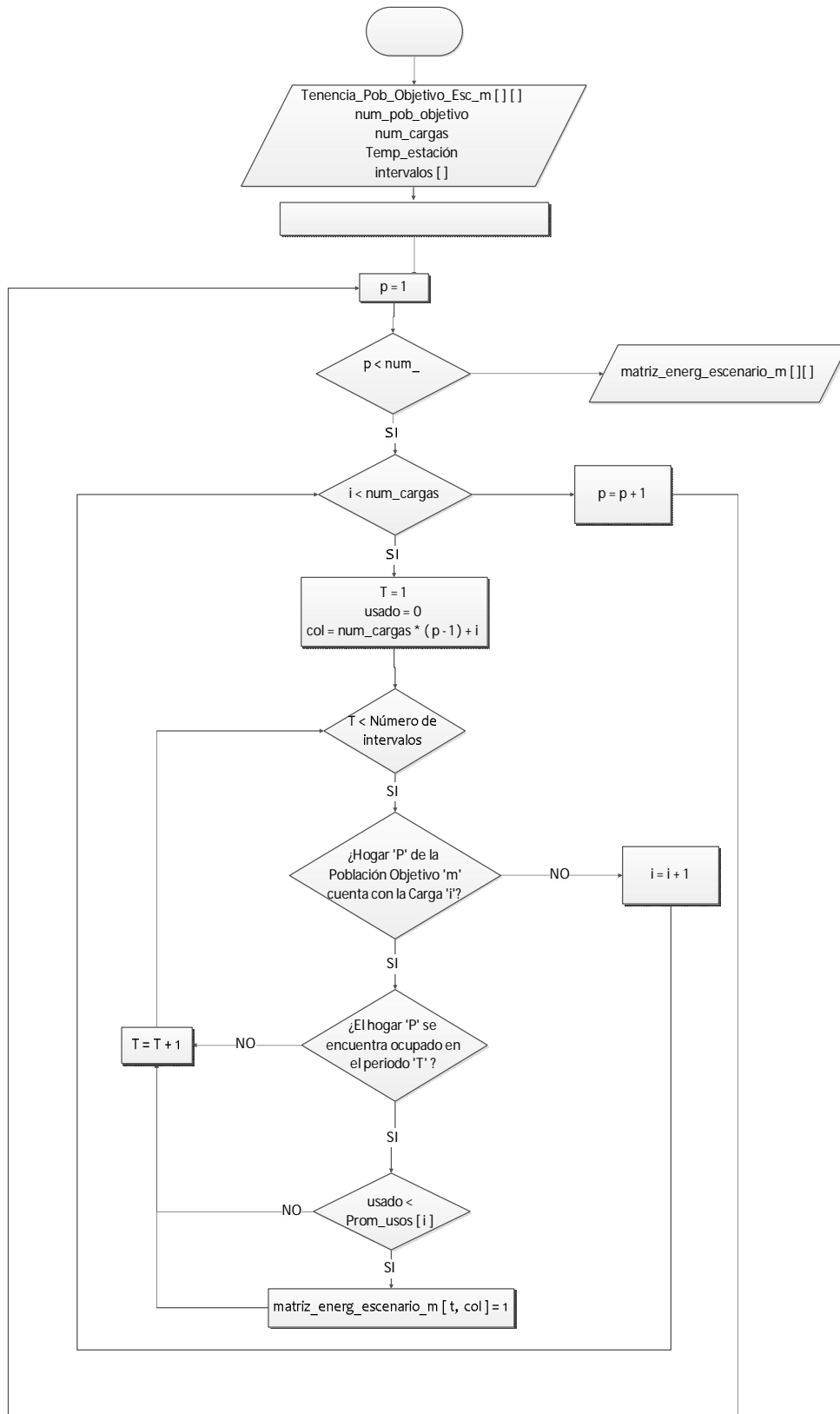


Figura 5.6: Diagrama de flujo de cálculo de matriz energética por escenario – Día Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

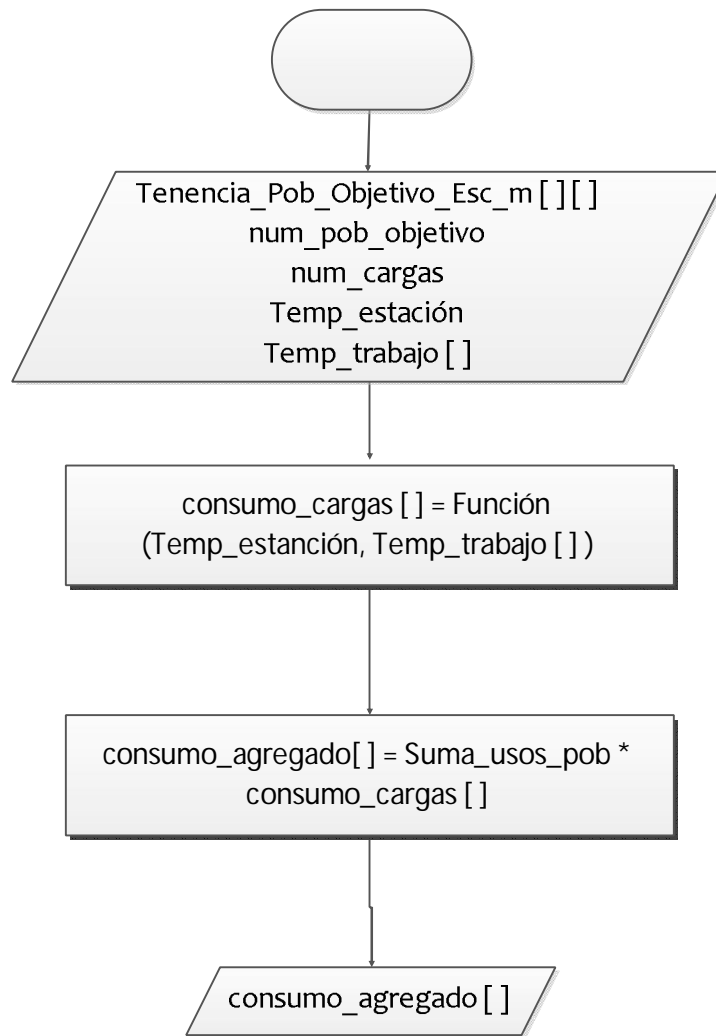


Figura 5.7: Diagrama de flujo para agregación – Día Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

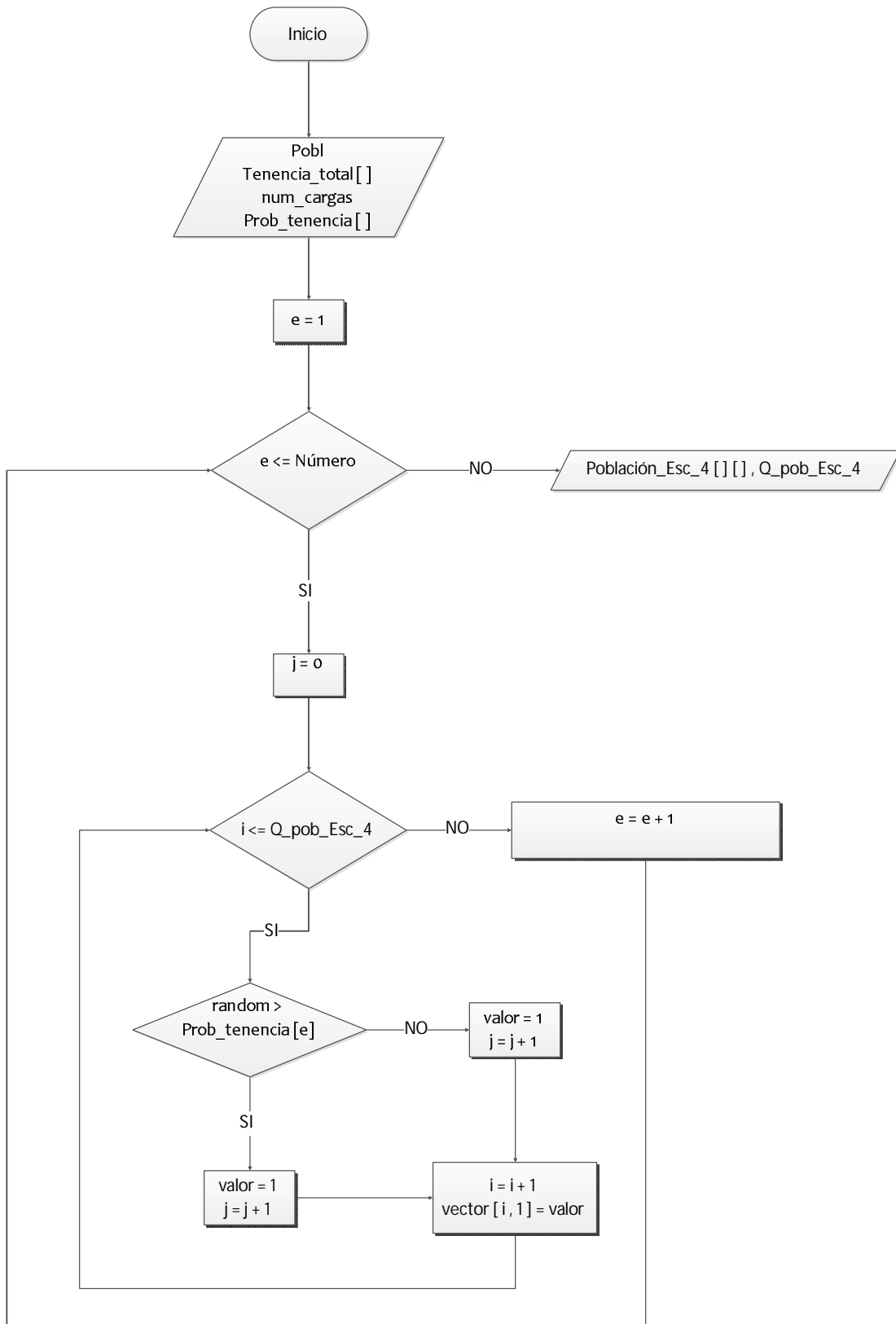


Figura 5.8: Diagrama de flujo de tenencia– Día No Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

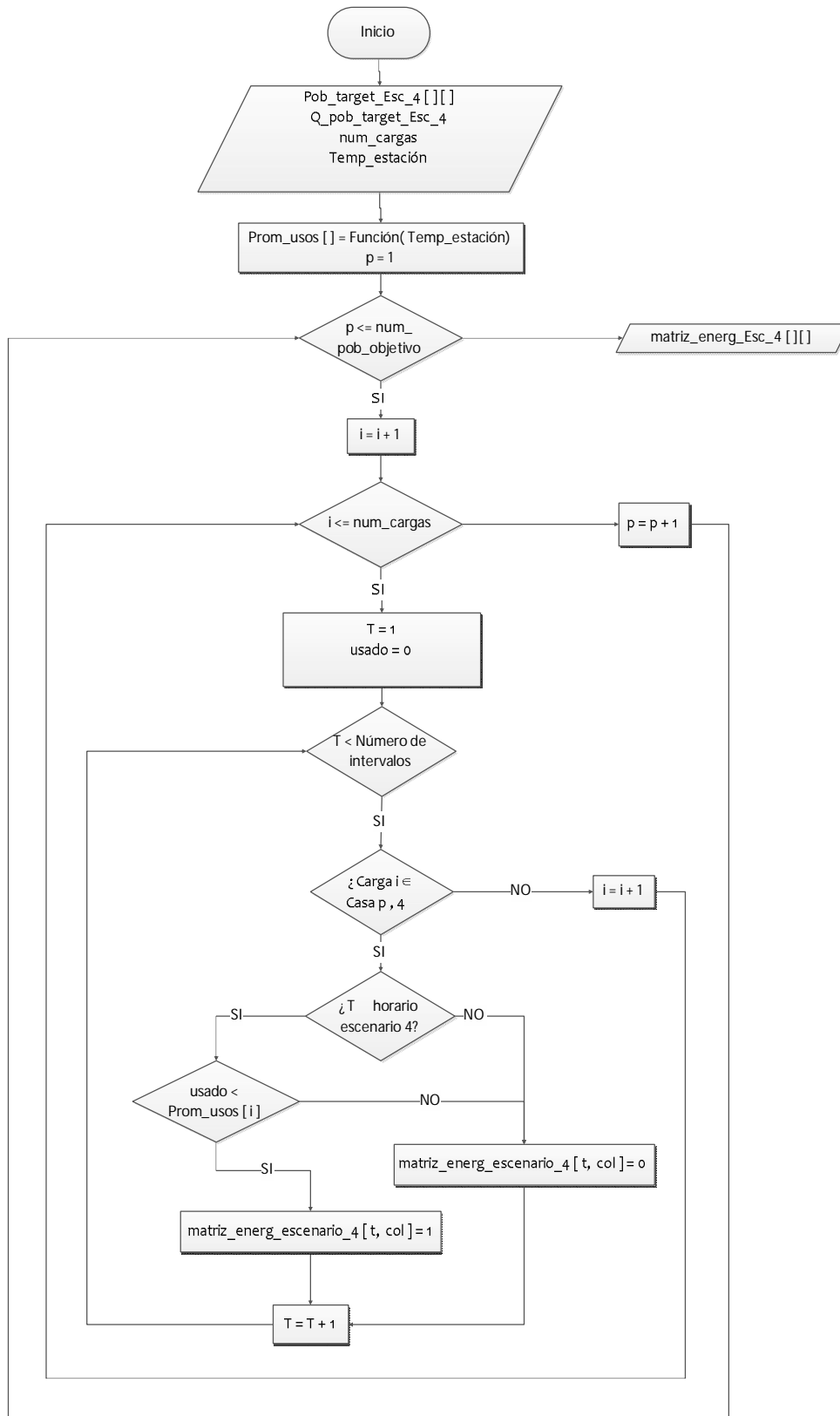


Figura 5.9: Diagrama de flujo de cálculo de matriz energética por escenario – Día No Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

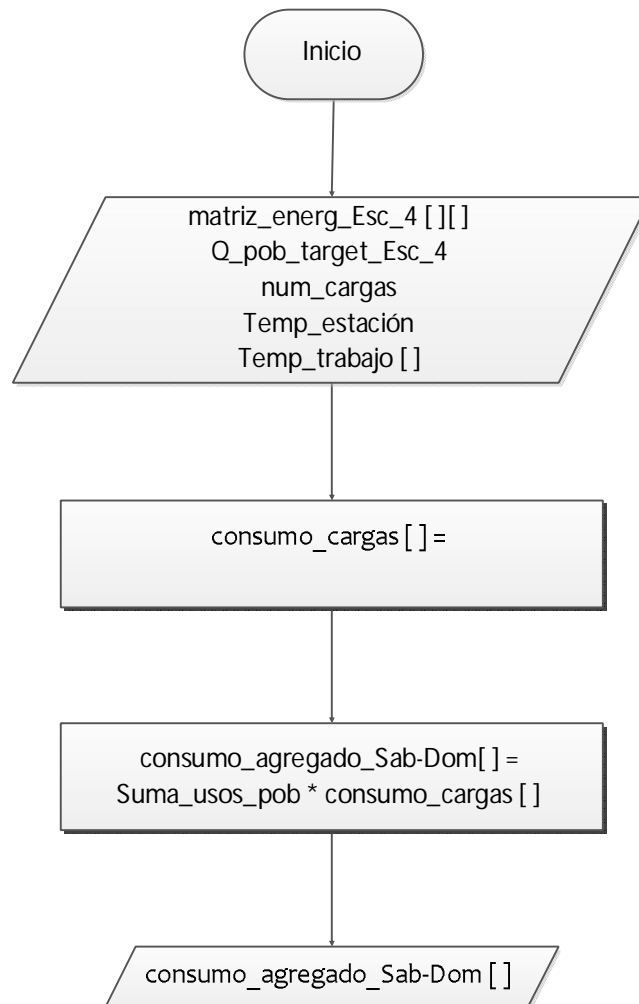


Figura 5.10: Diagrama de flujo para agregación – Día No Laborable. Fuente: Elaboración Propia.

Las salidas de todo el proceso son:

- Matriz de consumos agregada en el tiempo: Días Laborables Estación Cálida.
- Matriz de consumos agregada en el tiempo: Días No Laborables Estación Cálida.
- Matriz de consumos agregada en el tiempo: Días Laborables Estación Fría.
- Matriz de consumos agregada en el tiempo: Días No Laborables Estación Fría.

Para el desarrollo del modelo se utilizó la herramienta de *software* MATLAB, con un tiempo de simulación de 15 minutos, configurable. Los resultados se muestran en las figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16.

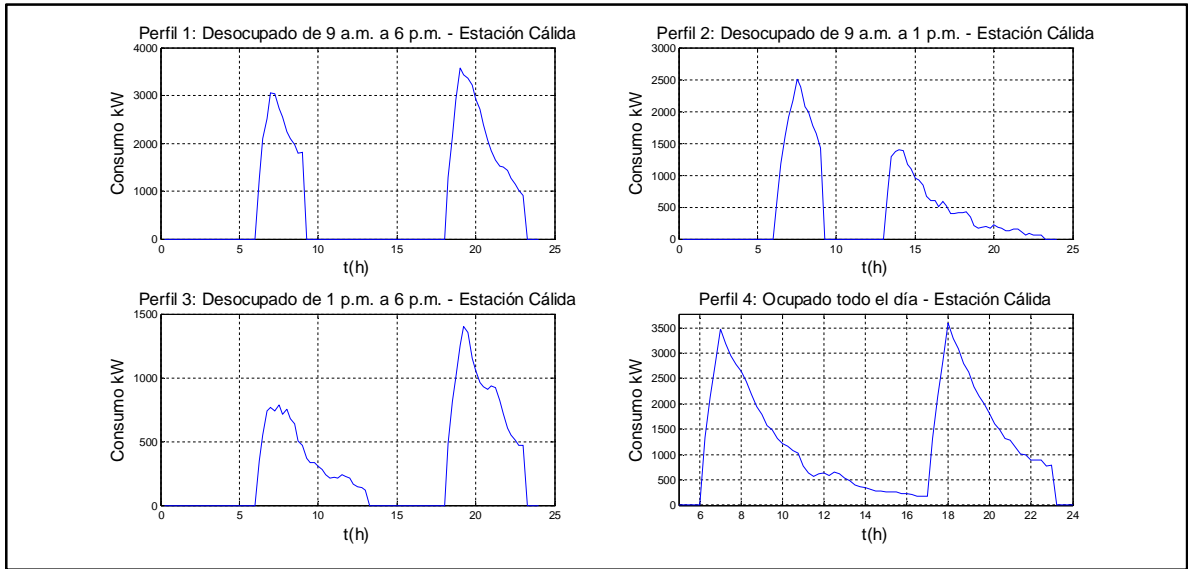


Figura 5.11: Consumos por escenarios Lunes a Viernes – Estación Cálida. Fuente: Elaboración Propia.

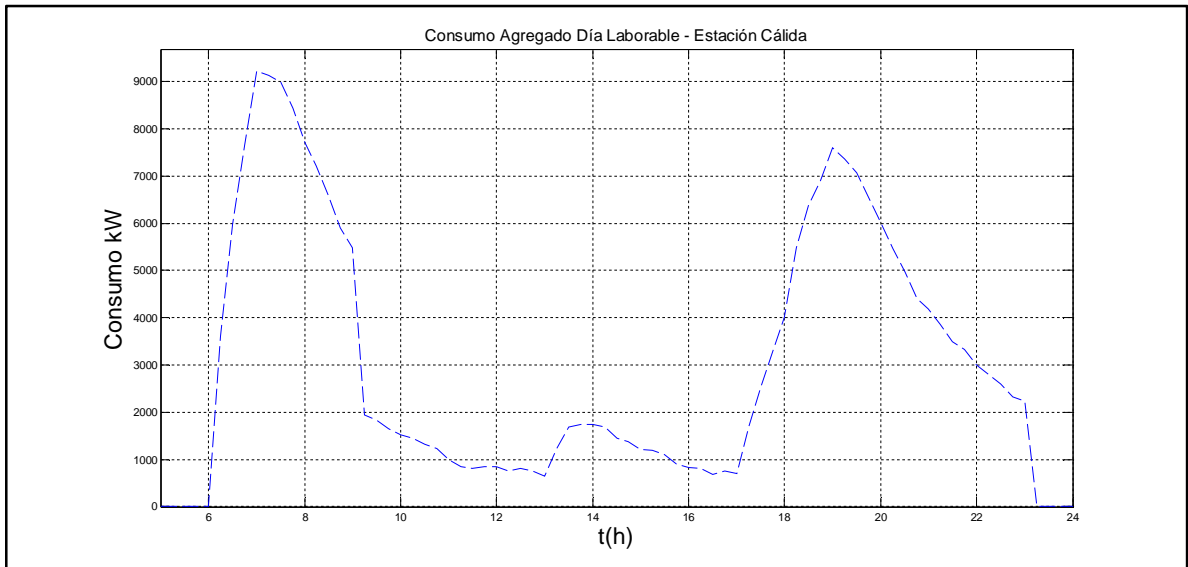


Figura 5.12: Consumos agregado Lunes a Viernes – Estación Cálida. Fuente: Elaboración Propia.

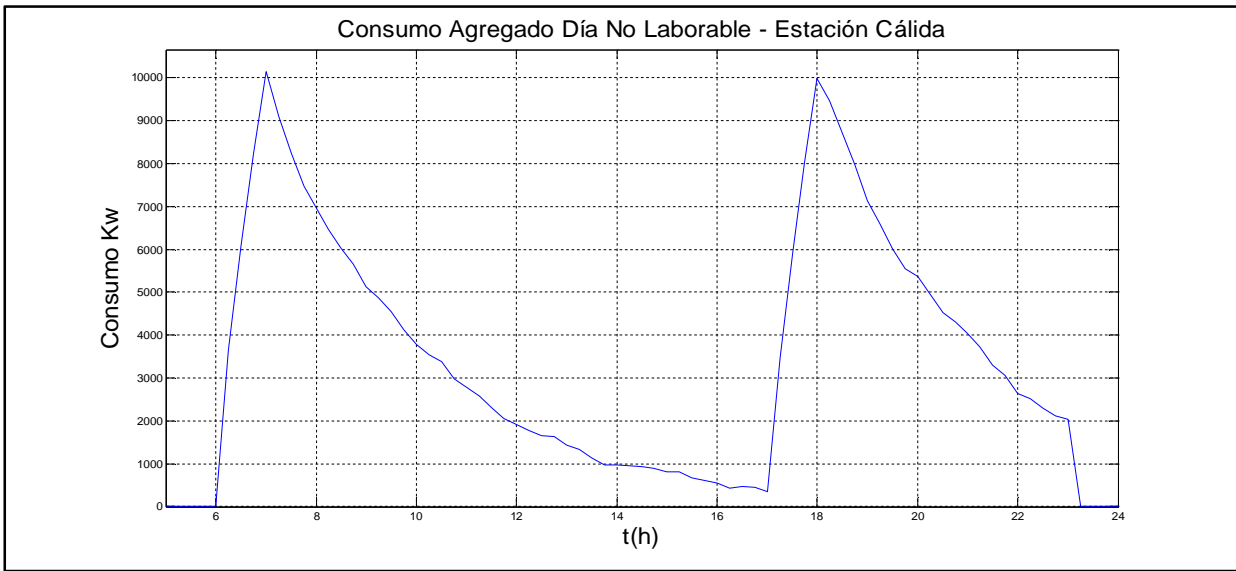


Figura 5.13: Consumos agregados Días No Laborables – Estación Cálida.
Fuente: Elaboración Propia.

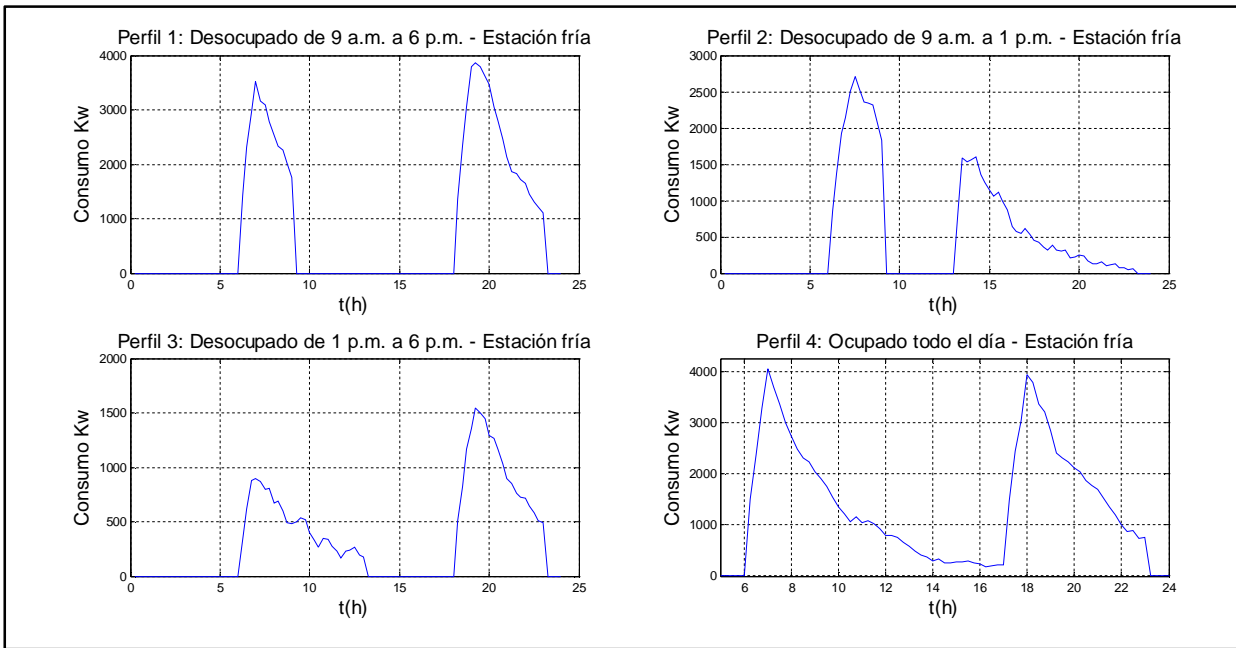


Figura 5.14: Consumos por escenarios Lunes a Viernes – Estación Fría.
Fuente: Elaboración Propia.

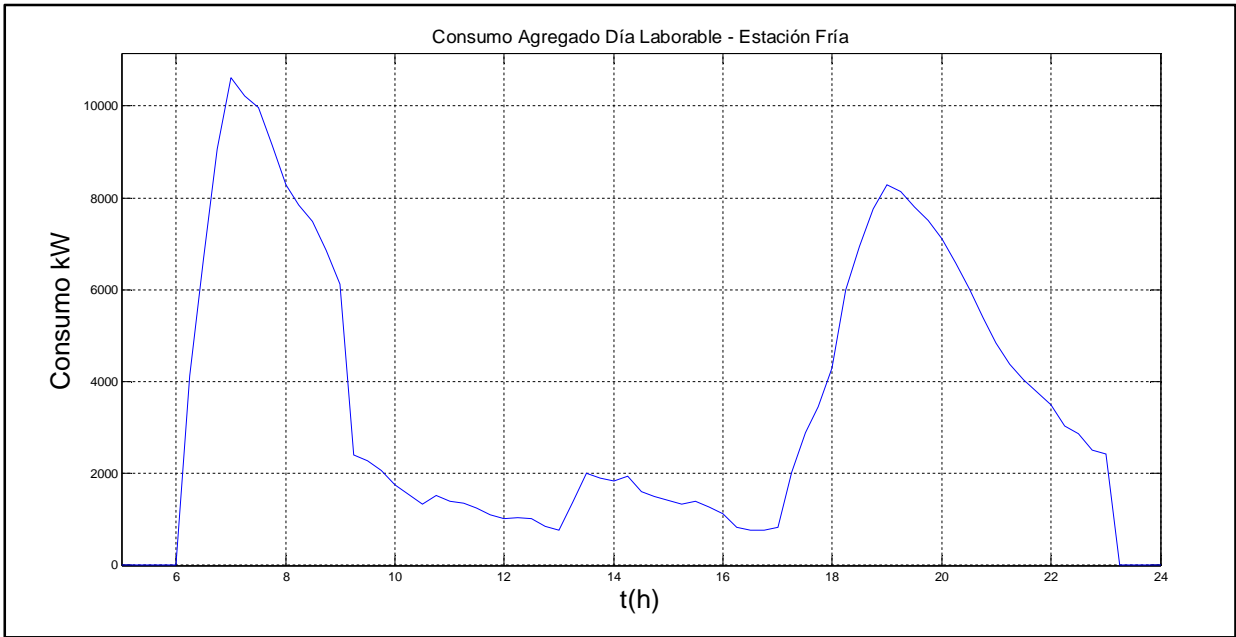


Figura 5.15: Consumos agregado Lunes a Viernes – Estación Fría.
Fuente: Elaboración Propia.

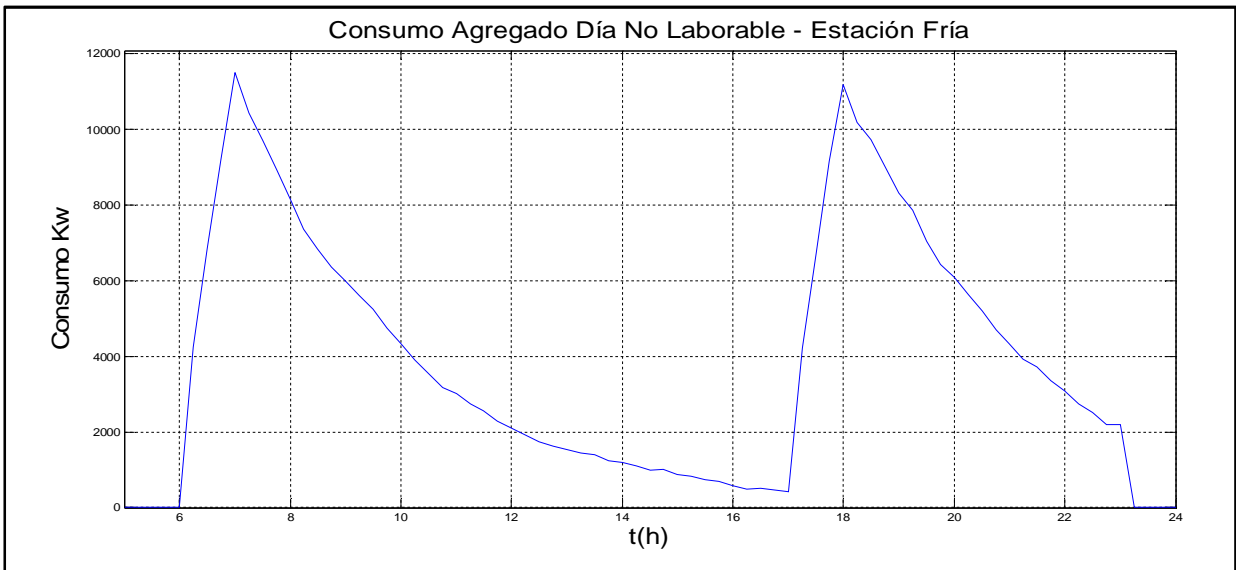


Figura 5.16: Consumos agregados Días No Laborables – Estación Fría.
Fuente: Elaboración Propia.

El diagrama de flujo para el cálculo del factor de coincidencia se muestra en la figura 5.17.

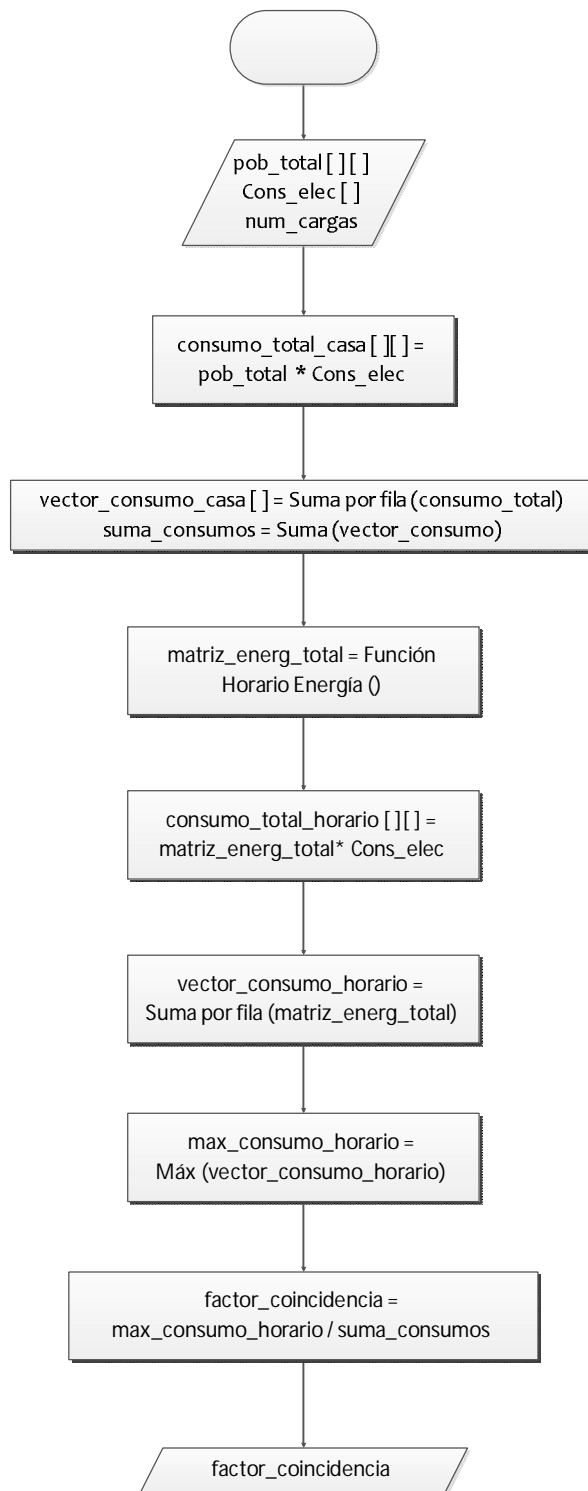


Figura 5.17: Diagrama de flujo para el cálculo del factor de coincidencia.

Fuente: Elaboración Propia.

Los factores de coincidencia y los consumos máximos obtenidos para cada tipo de día, y para una muestra aleatoria, se listan en la tabla 5.8:

Tabla 5.8: Factores de coincidencia obtenidos.

| Tipo de día | Factor de Coincidencia | Consumo Máximo (kW) |
|----------------------------------|------------------------|---------------------|
| Día Laborable Estación Cálida | 13.93% | 9,22 |
| Día No Laborable Estación Cálida | 21.29% | 10,01 |
| Día Laborable Estación Fría | 14.13% | 10.06 |
| Día No Laborable Estación Fría | 21.26% | 11.51 |

De acuerdo con los resultados obtenidos, los días no laborables se tiene un mayor factor de coincidencia, es decir, más usuarios encienden más electrodomésticos al mismo tiempo, con relación a los días laborables. Los consumos máximos para los días laborables son también menores, influenciados por el tiempo limitado de permanencia en la casa. Es importante recordar en este punto que las curvas obtenidas del modelamiento consideran exclusivamente los consumos de las cargas elegibles y no incluye las cargas base, como el televisor, iluminación, plancha, etc., descritas anteriormente.

En cuanto a la comparación entre estaciones, el consumo en estaciones frías es mayor que es estaciones cálidas. Esto se debe a que los electrodomésticos DHW en estaciones frías, requieren de mayor consumo energético para calentar el agua a niveles de *confort* para el usuario.

5.3. Estrategia de Control Propuesta

Con el modelo del consumidor residencial y con los factores de coincidencia iniciales, se propone una estrategia de control para la respuesta del sistema ante contingencias. Como se menciona en el capítulo 2, el éxito de los programas DSM recae, además de la correcta selección del público objetivo, en factores físicos y conductuales. En el Perú la información disponible de medidas de eficiencia energética es muy escasa y, por ende, las acciones disponibles para los usuarios, limitadas. Las recomendaciones para implementaciones en países en desarrollo, como el Perú, convergen a implementaciones de mediano y largo plazo en el que el factor conductual va ganando influencia en los resultados obtenidos [2].

El programa DSM utilizado de control directo de cargas le permite a la empresa distribuidora, bajo condiciones contractuales, desconexión o manipulación (por ejemplo, para aires acondicionados) de las cargas de los usuarios, conocidos como inhibiciones, asegurándoles que estas tendrán una frecuencia y duración máxima en periodos definidos en el contrato. Aunque visto de manera sencilla, el factor comodidad juega un papel importante en la decisión de incorporarse al programa y luego, de mantenerse en él. Por tanto, para estimar el impacto para la empresa distribuidora y para el usuario final y la consiguiente aceptación de ambas partes, será necesario mantener registro de las magnitudes y frecuencias de las contingencias que puedan ser 'atendidas', los costos de inversión, para la distribuidora, y de 'confort', para el usuario.

Las acciones que la empresa distribuidora puede tomar sobre las cargas de los usuarios, dependerá de:

- Tenencia del usuario.
- Probabilidad de uso del electrodoméstico en el instante que inicia la contingencia.
- Estado (conectado o desconectado) del electrodoméstico en el instante en el que inicia la contingencia.
- Tipo de carga sobre la que se aplica el control.

Las acciones correctivas del control son dos: desconexión y reducción parcial de carga.

La desconexión es la salida total de la carga y se da únicamente para las cargas tipo CUIE.

La reducción parcial de la carga modifica parcialmente el consumo de la misma, mediante la modificación de uno o más parámetros de funcionamiento. Esta acción de control se aplica para la carga CE, i.e. el aire acondicionado, mediante la modificación de la temperatura *setpoint* establecida por el usuario. La modificación de la carga es gradual, distribuida en los periodos de control y depende de la relación entre la temperatura ambiental y la temperatura *setpoint*, que a su vez depende de la estación climática.

Un atributo adicional importante para asegurar la robustez del control, es la histéresis. Este factor se utiliza sobre la potencia *setpoint* o potencia de contingencia para las simulaciones, y normalmente varía entre el 1 y 3%. El factor de histéresis permite asegurar la estabilidad y seguridad del sistema antes de liberar las cargas para su utilización evitando una posible manipulación caótica. El valor máximo usualmente

considerado es de 3% para no incrementar significativamente el tiempo de recorte de carga requerido.

La duración de la contingencia para la simulación se considera de 24 horas, a fin de evitar el análisis en las horas punta, en las que ocurren los máximos consumos y en donde el control es de mayor utilidad.

Las variables utilizadas y sus valores considerados para la simulación son:

- Pn: Potencia Nominal de Alimentación del Sistema Simulado (kW) – 12,000kW.
- Pobl: Cantidad de personas del sistema del Pn – 1000.
- Pcons,t: Potencia de consumo de Pobl en tiempo t.
- Pob_tg: Población *target* – matriz variable ϵ Pobl.
- Escm: Escenario m de permanencia en el hogar – [1, 2, 3, 4] de acuerdo a valores de tabla 5.1.
- Cpt,t: Carga del consumidor número pt en el instante t – variable en función de modelamiento de predicción.
- Ticont: Periodo de inicio de la contingencia (15 min) – variable entre 1 y 96.
- Tfcont: Periodo de fin de la contingencia (15 min) – variable 1 y 96.
- Mcont: Magnitud de la contingencia (%) – variable entre 5 y 30%.
- Tamb: Temperatura ambiente (°C) – Aleatorio dentro de rangos de tabla 5.3.
- Tset: Temperatura setpoint (°C) – Aleatorio dentro de rangos de tabla 5.3.
- Tsal,n: Temperatura del agua de salida para el electrodoméstico n (°C) – Aleatorio dentro de rangos de tabla 5.5.
- Tin,n: Temperatura del agua de entrada para el electrodoméstico n (°C) – Aleatorio dentro de rangos de tabla 5.5.
- Td: Tipo de día – [1,2,3,4] \leftrightarrow [Laborable Cálido, Laborable Frío, No Laborable Cálido, No Laborable Frío].
- Pcont: Potencia de Contingencia o potencia máxima disponible para el sistema durante la contingencia (kW) – variable igual a $(1-Mcont)*Pn$.
- Fhist: Factor de histéresis - variable entre 1 y 3%.
- Fcc: Factor de coincidencia control – variable resultado.

En resumen, las consideraciones para el control propuesto, son:

- Programa de control directo de cargas únicamente aplicado a población *target* Pob_{tg} .
- Cálculo de consumos aplicado a población total $Pobl$.
- Simulaciones con $Mcont$ con valores 5 a 30% y duración fija de 24 horas (ΔT_{fcont} , $T_{icont} = 96$)
- F_{hist} variable de 1% a 3%.
- Periodos de simulación de 15 min.

Las acciones de control son:

Si $t \in [T_{icont}, T_{fcont}]$:

Si $P_{cons,t} > P_{cont}$ entonces, sólo para Pob_{tg} :

- Si $C_{pt,t} = 0$ & $C_{pt} \in CUIE$, entonces Inhibir $C_{p,t}$
- Si $C_{pt,t} = 1$ & $C_{pt} \in CUIE$, entonces Mantener $C_{p,t}$ de modelo
- Si $C_{pt,t} = 0$ & $C_{pt} \in CE$, entonces Inhibir $C_{p,t}$
- Si $C_{pt,t} = 1$ & $C_{pt} \in CE$ & $T_{amb} > T_{set}$, entonces $T_{set} = T_{set} + 1^\circ C$
- Si $C_{pt,t} = 1$ & $C_{pt} \in CE$ & $T_{amb} < T_{set}$, entonces $T_{set} = T_{set} - 1^\circ C$

Las consideraciones y acciones propuestas se reflejan de manera general en el diagrama de bloques y el diagrama de flujos, presentados en la figuras 5.18 y 5.19.

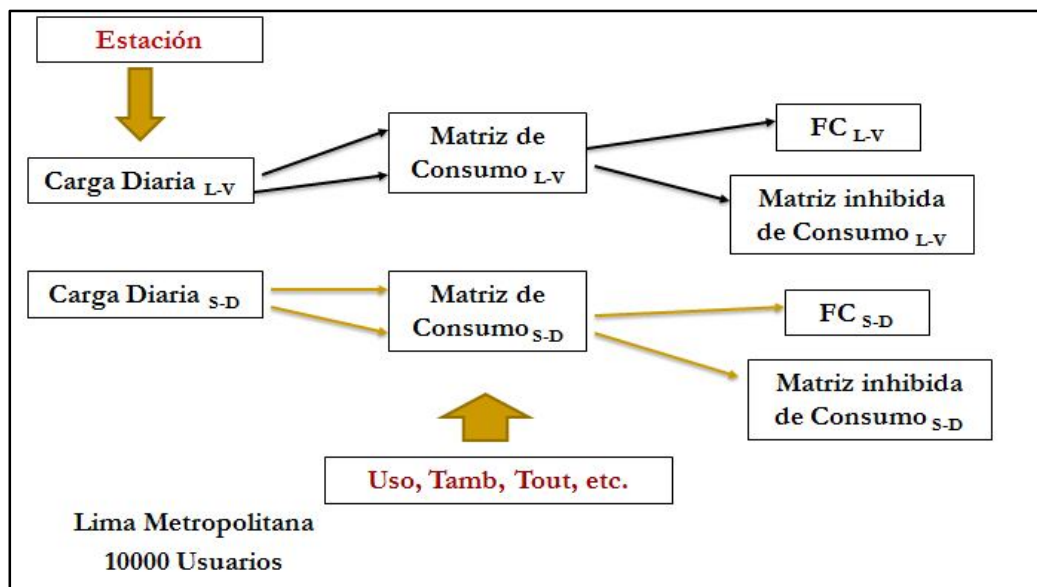


Figura 5.18: Diagrama de bloques del control propuesto. Fuente: Elaboración Propia.

Con la aplicación de control, los consumos máximos, el factor de coincidencia, la cantidad de inhibiciones y la duración de las mismas, se muestran en la tabla 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12.

Tabla 5.9: Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Cálida.

| Días Laborables Estación Cálida | | | | | | |
|---------------------------------|----------|---------------------|-------|------|-----------|---------------------|
| Mcont | FC(ti-1) | Pmax (ti-1) (kW) | Q inh | Tinh | FC (to+1) | Pmax (to+1) (kW) |
| 5% | 14.63% | 9.69 | 0 | 0 | 14.63% | 9.69 |
| 10% | 14.93% | 9.88 | 0 | 0 | 14.93% | 9.88 |
| 15% | 13.74% | 9.10 | 0 | 0 | 13.74% | 9.10 |
| 20% | 14.26% | 9.44 | 0 | 0 | 14.26% | 9.44 |
| 25% | 14.59% | 9.66 | 430 | 3 | 14.59% | 9.66 |
| 30% | 14.83% | 9.82 | 1380 | 3 | 13.41% | 8.88 |

Tabla 5.10: Valores obtenidos del control: Días No Laborables Estación Cálida.

| Días No Laborables Estación Cálida | | | | | | |
|------------------------------------|----------|---------------------|-------|------|-----------|---------------------|
| Mcont | FC(ti-1) | Pmax (ti-1) (kW) | Q inh | Tinh | FC (to+1) | Pmax (to+1) (kW) |
| 5% | 21.48% | 10.24 | 0 | 0 | 21.48% | 10.24 |
| 10% | 21.07% | 10.05 | 0 | 0 | 21.07% | 10.05 |
| 15% | 21.20% | 10.11 | 0 | 0 | 21.20% | 10.11 |
| 20% | 22.02% | 10.51 | 2522 | 3 | 20.35% | 9.71 |
| 25% | 21.63% | 10.21 | 4315 | 6 | 17.19% | 8.21 |
| 30% | 21.40% | 10.13 | 5332 | 6 | 16.60% | 7.92 |

Tabla 5.11: Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Fría.

| Días Laborables Estación Fría | | | | | | |
|-------------------------------|----------|---------------------|-------|------|-----------|---------------------|
| Mcont | FC(ti-1) | Pmax (ti-1) (kW) | Q inh | Tinh | FC (to+1) | Pmax (to+1) (kW) |
| 5% | 14.56% | 10.94 | 0 | 0 | 14.56% | 10.94 |
| 10% | 14.50% | 10.90 | 281 | 2 | 13.87% | 10.42 |
| 15% | 14.21% | 10.69 | 547 | 3 | 13.37% | 10.05 |
| 20% | 14.38% | 10.81 | 683 | 3 | 12.55% | 9.43 |
| 25% | 15.08% | 11.34 | 1622 | 5 | 11.63% | 8.74 |
| 30% | 13.96% | 10.51 | 2403 | 12 | 11.34% | 8.52 |

Tabla 5.12: Valores obtenidos del control: Días Laborables Estación Fría.

| Días No Laborables Estación Fría | | | | | | |
|----------------------------------|----------|------------------|-------|------|-----------|------------------|
| Mcont | FC(ti-1) | Pmax (ti-1) (kW) | Q inh | Tinh | FC (to+1) | Pmax (to+1) (kW) |
| 5% | 21.35% | 11.56 | 603 | 2 | 21.16% | 11.45 |
| 10% | 20.83% | 11.28 | 796 | 3 | 19.15% | 10.36 |
| 15% | 21.67% | 11.73 | 1021 | 4 | 18.15% | 9.82 |
| 20% | 21.35% | 11.56 | 2686 | 6 | 17.48% | 9.46 |
| 25% | 20.95% | 11.34 | 5672 | 9 | 15.54% | 8.41 |
| 30% | 21.47% | 11.62 | 7879 | 10 | 15.41% | 8.34 |

Las cargas resultantes para los días Laborables en estaciones cálidas para diferentes valores de contingencias, con duración de 24 horas, se muestra en las figuras 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 y 5.25.

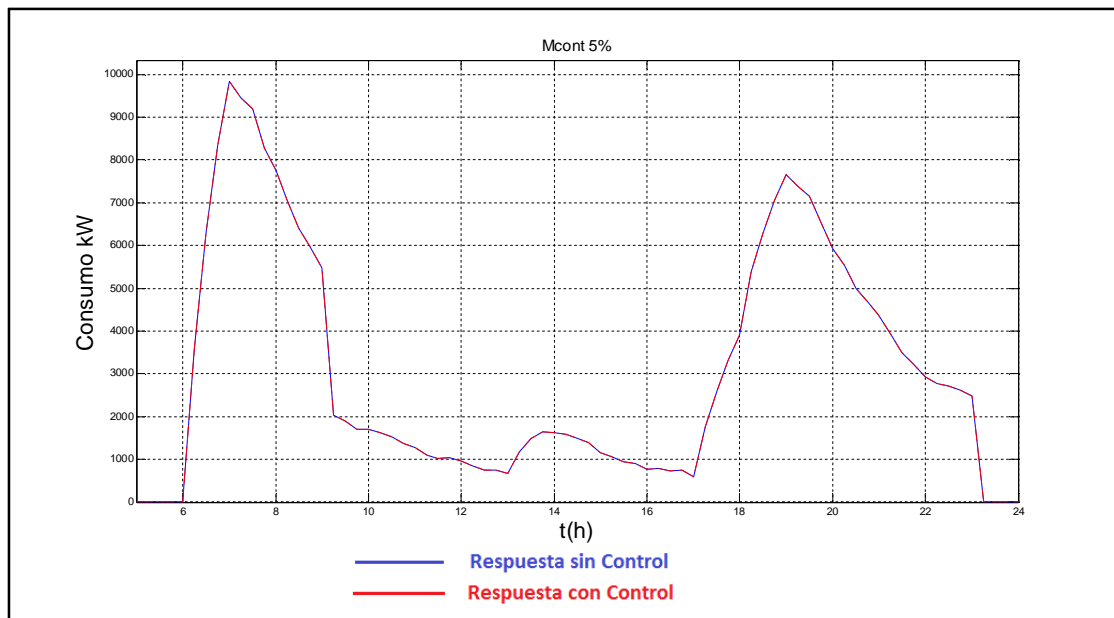


Figura 5.20: Respuesta a Mcont=5% Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

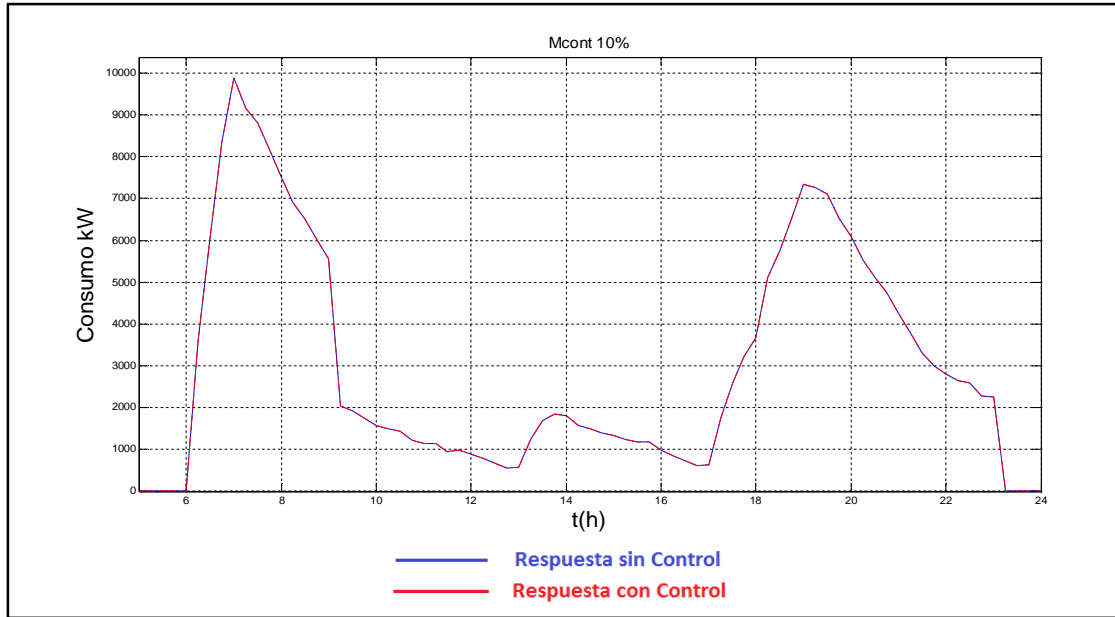


Figura 5.21: Respuesta a Mcont=10% Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

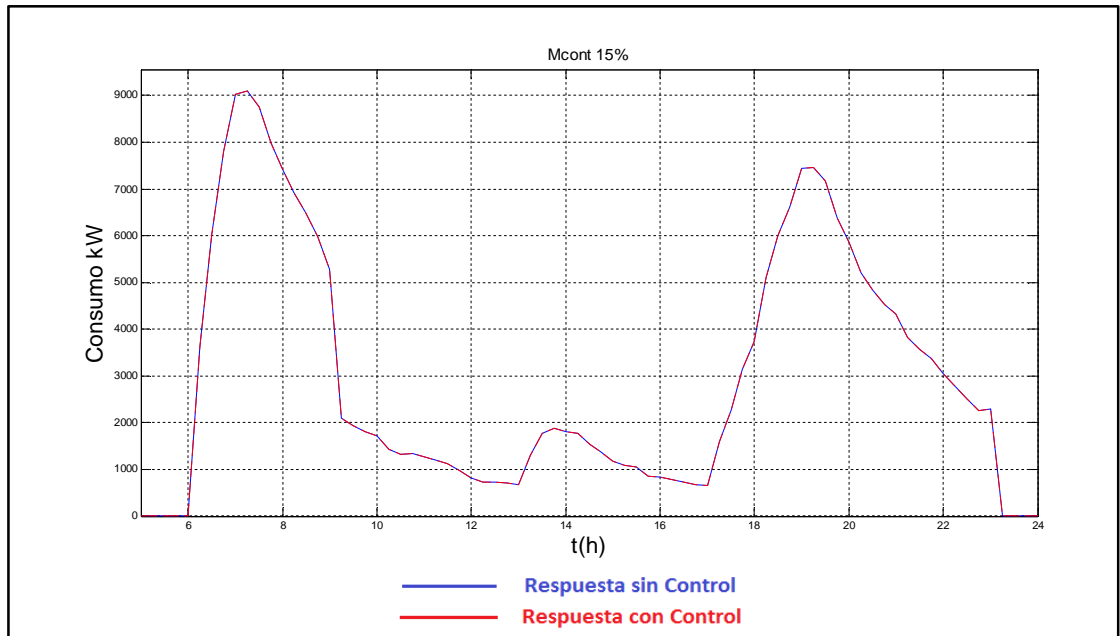


Figura 5.22: Respuesta a Mcont=15% Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

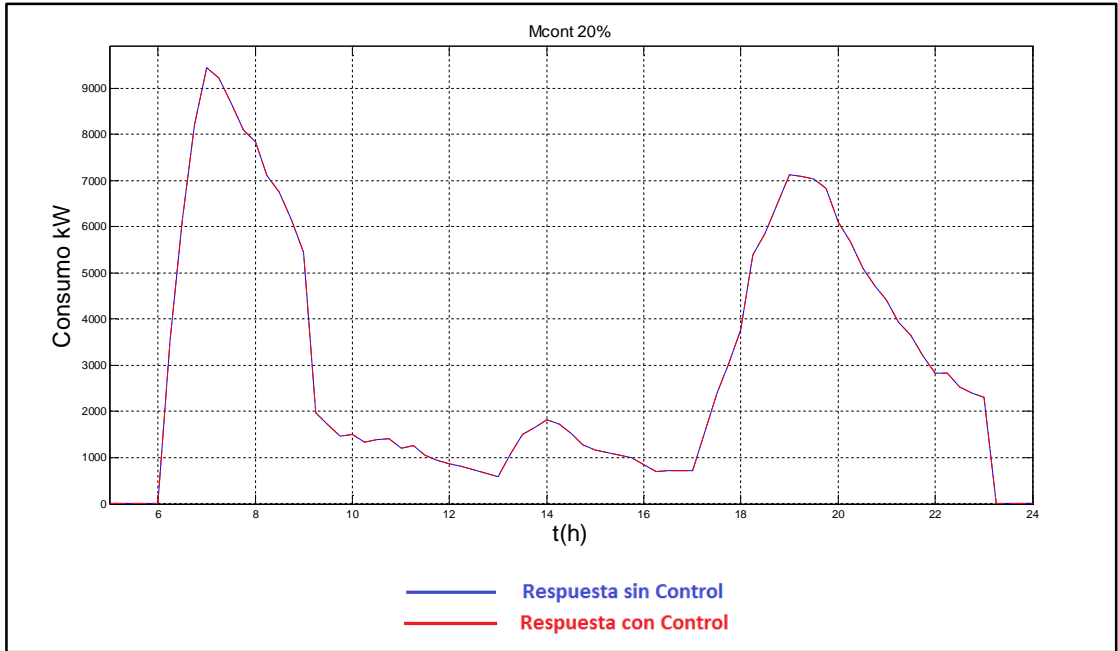


Figura 5.23: Respuesta a $M_{cont}=20\%$ Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

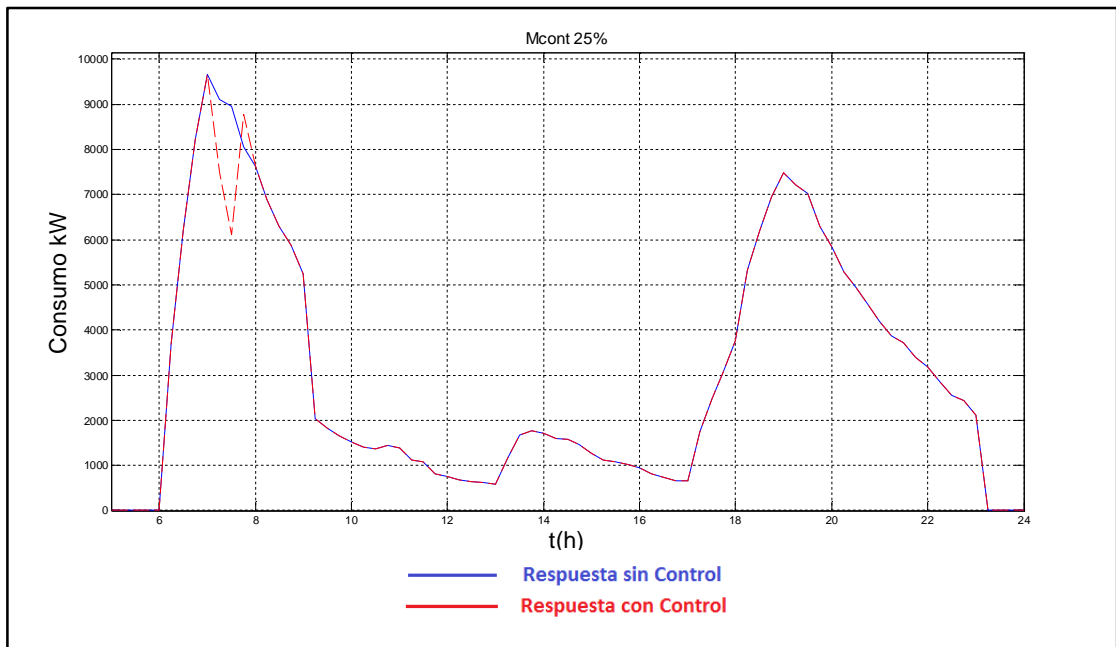


Figura 5.24 Respuesta a $M_{cont}=25\%$ Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

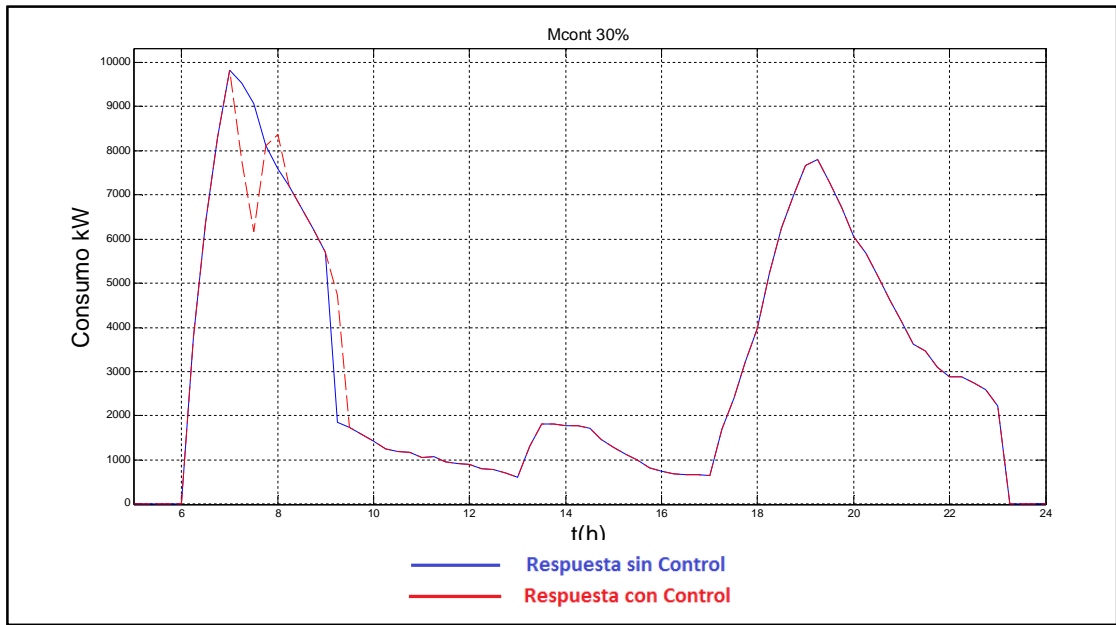


Figura 5.25: Respuesta a Mcont=30% Día Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

Las cargas resultantes para los días No Laborables en estaciones cálidas para diferentes valores de contingencias, con duración de 24 horas, se muestra en las figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 y 5.31.

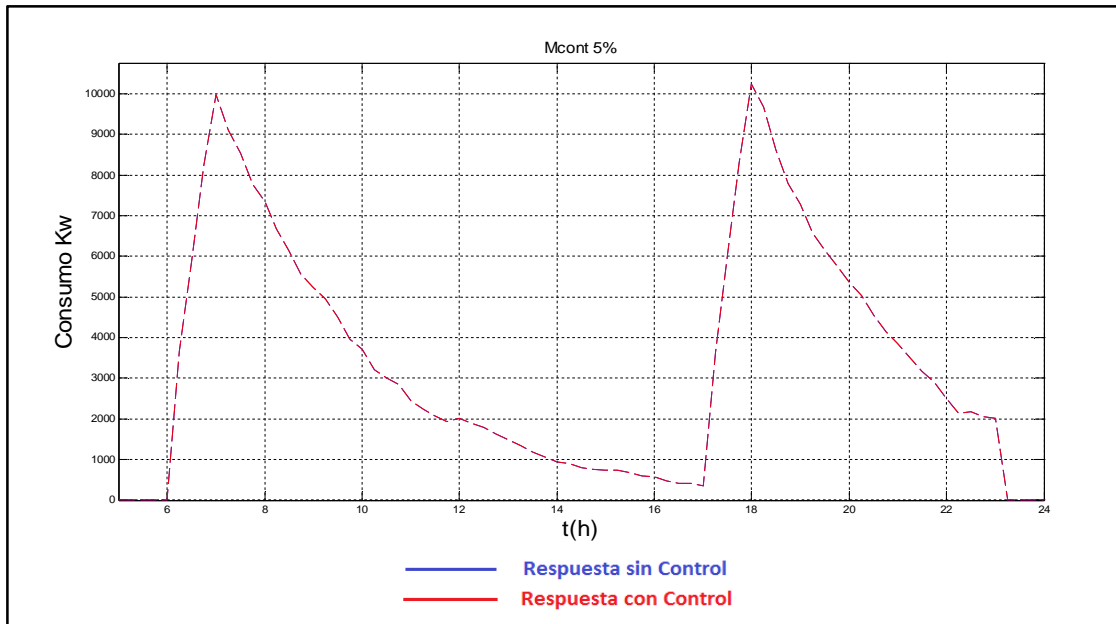


Figura 5.26: Respuesta a Mcont=5% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

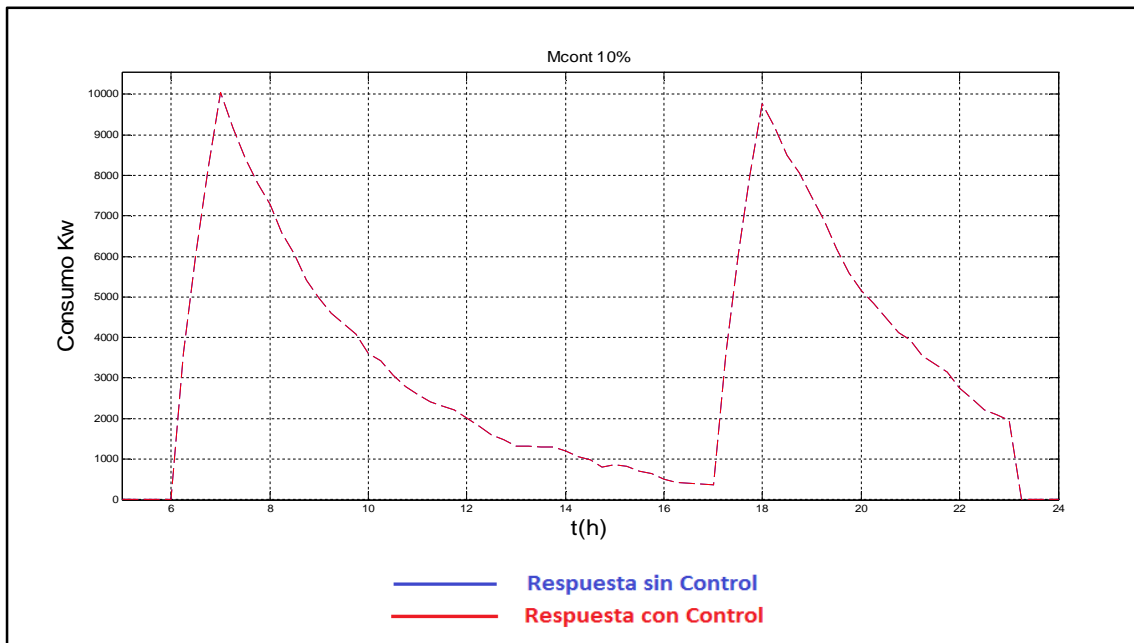


Figura 5.27: Respuesta a Mcont=10% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

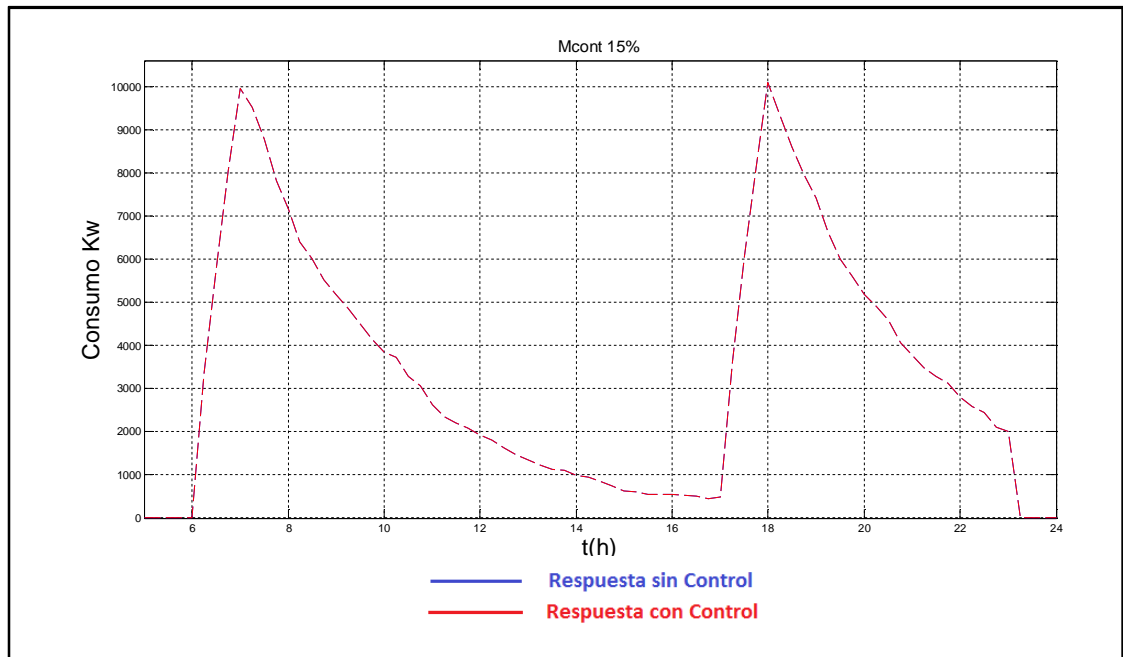


Figura 5.28: Respuesta a Mcont=15% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

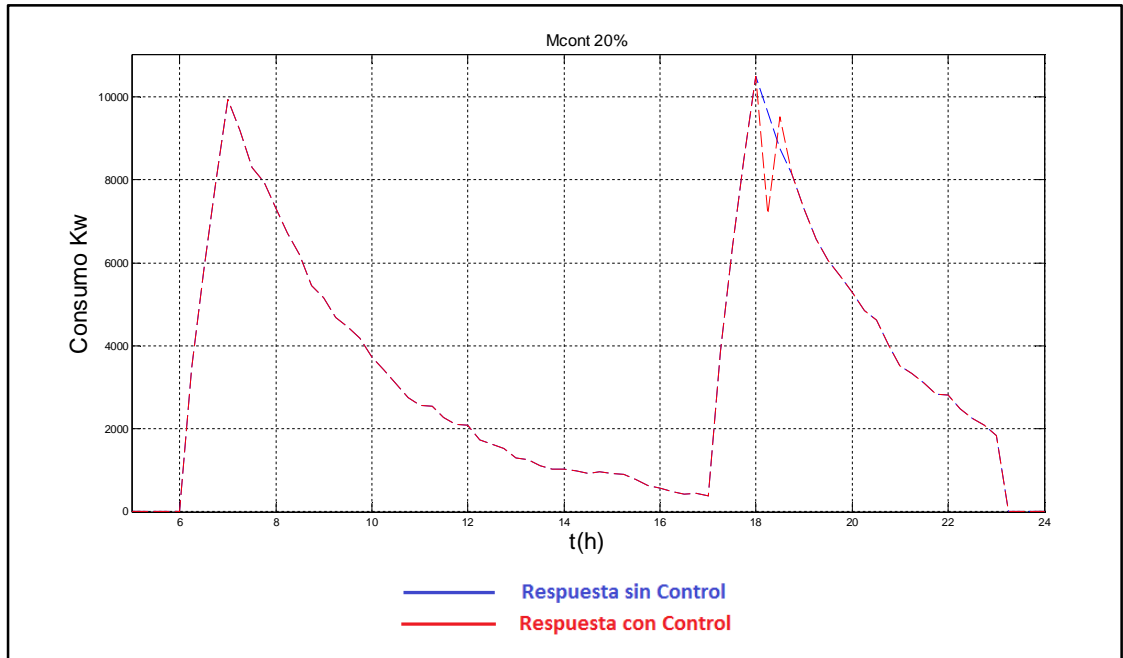


Figura 5.29: Respuesta a Mcont=20% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

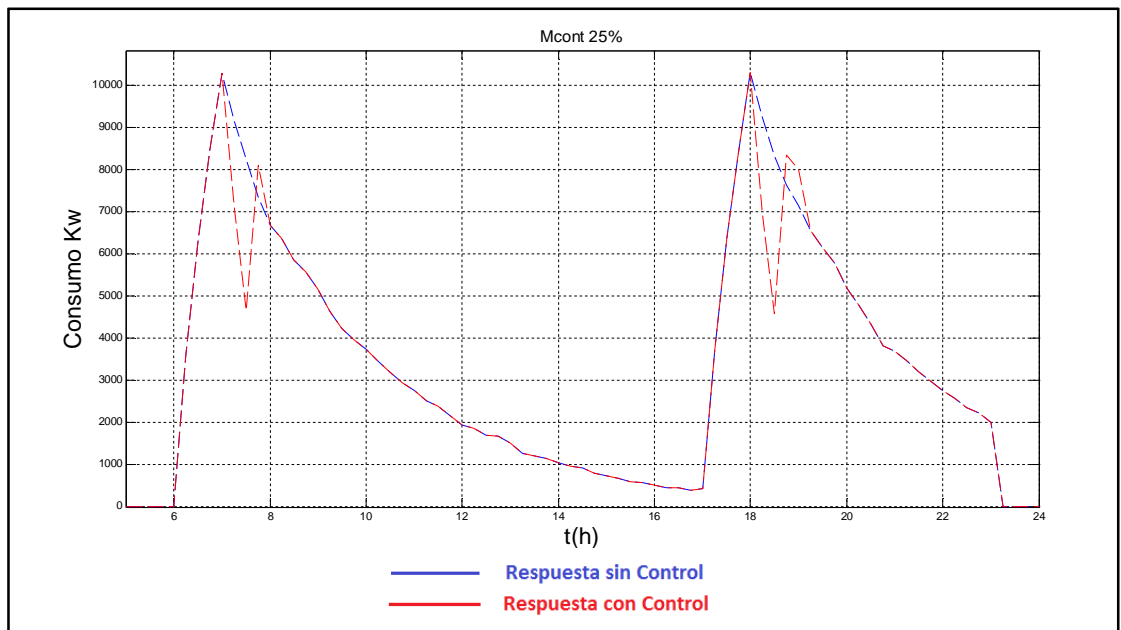


Figura 5.30: Respuesta a Mcont=25% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

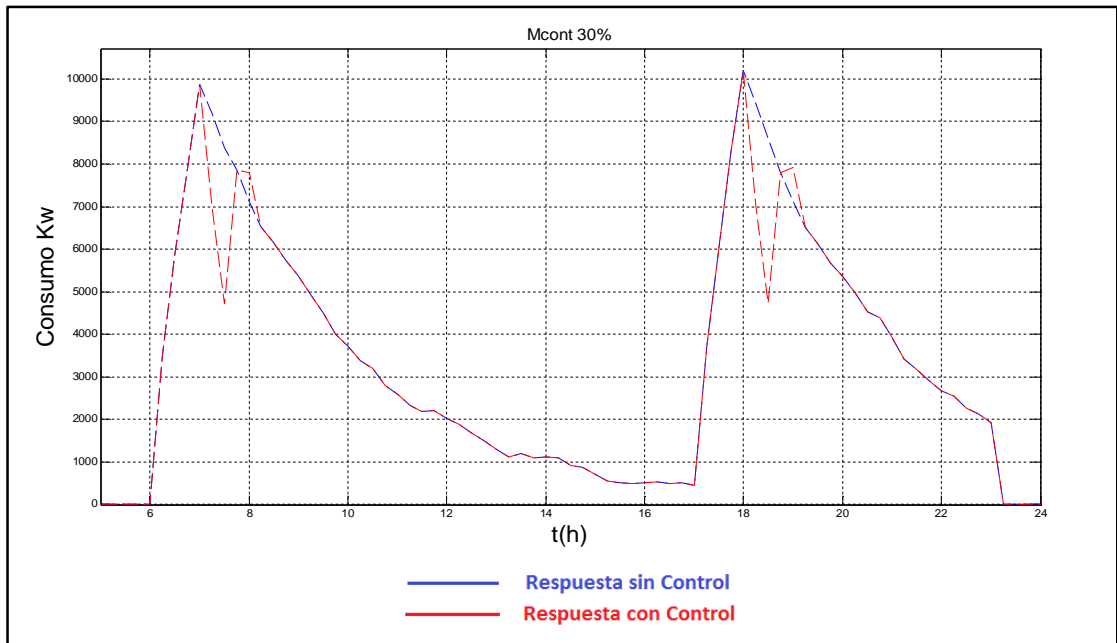


Figura 5.31: Respuesta a Mcont=30% Día No Laborable Cálido. Fuente: Elaboración Propia.

Las cargas resultantes para los días Laborables en estaciones frías para diferentes valores de contingencias, con duración de 24 horas, se muestra en las figuras 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 y 5.37.

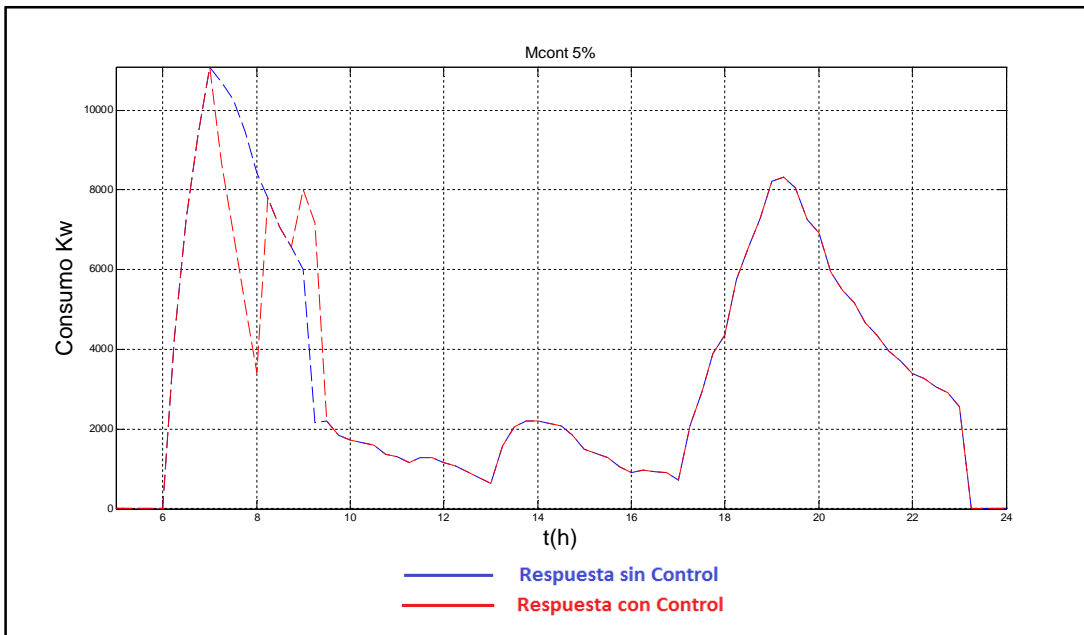


Figura 5.32: Respuesta a Mcont=5% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

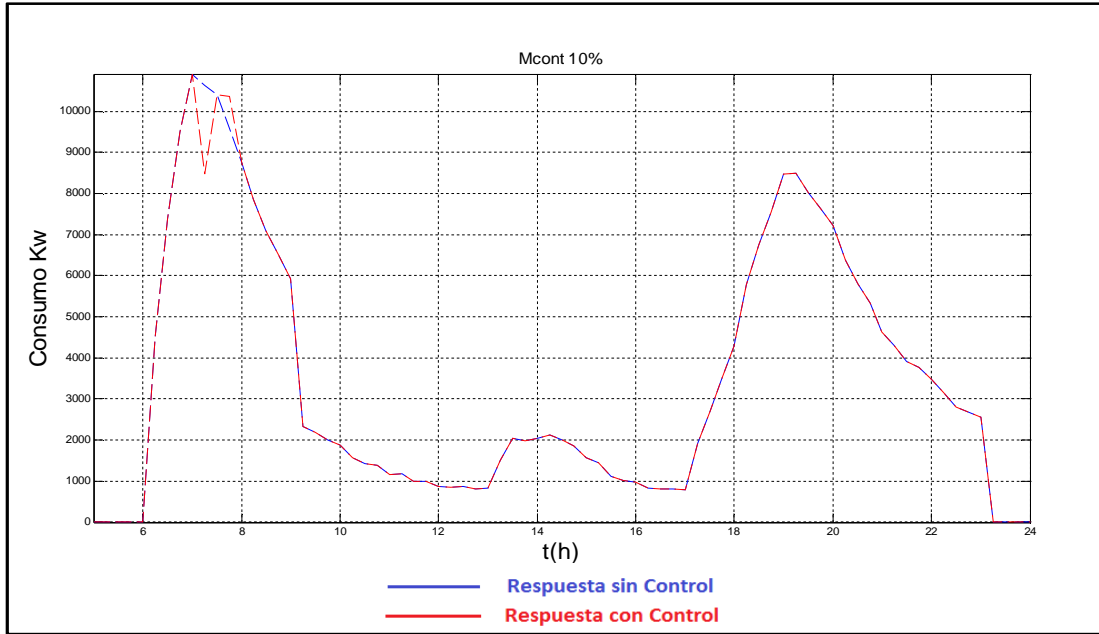


Figura 5.33: Respuesta a Mcont=10% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

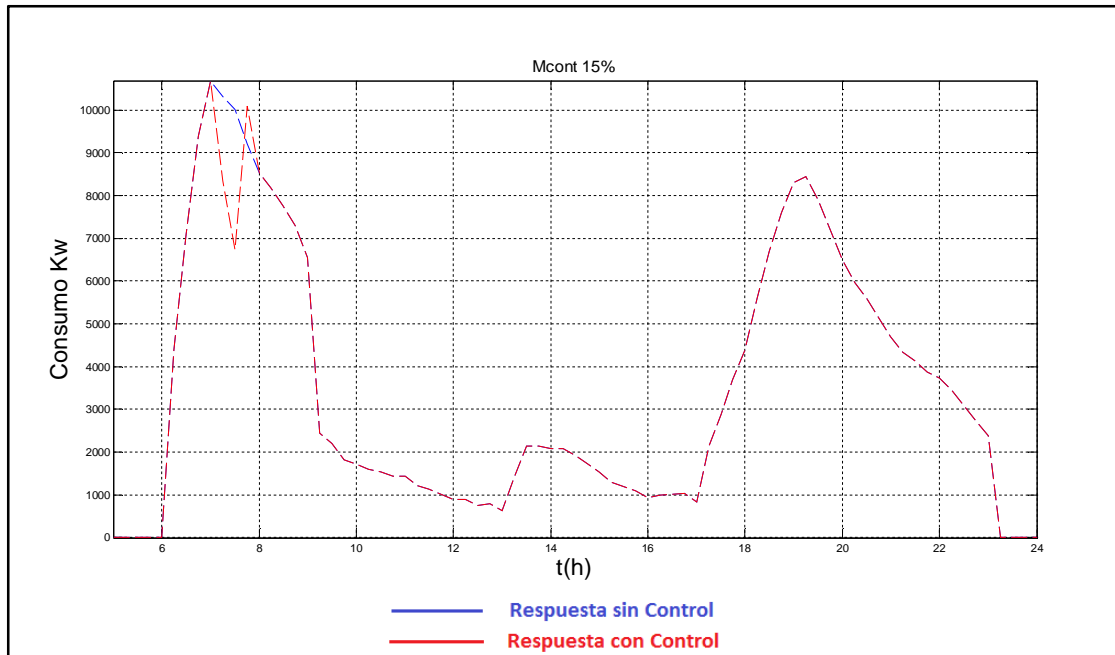


Figura 5.34: Respuesta a Mcont=15% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

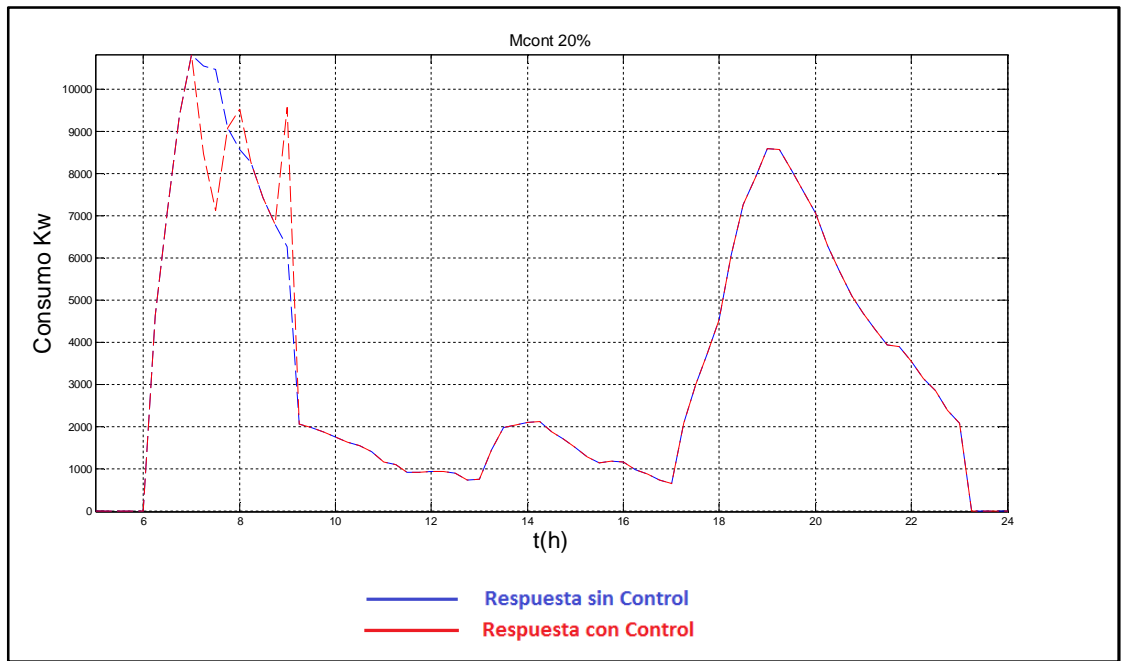


Figura 5.35: Respuesta a Mcont=20% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

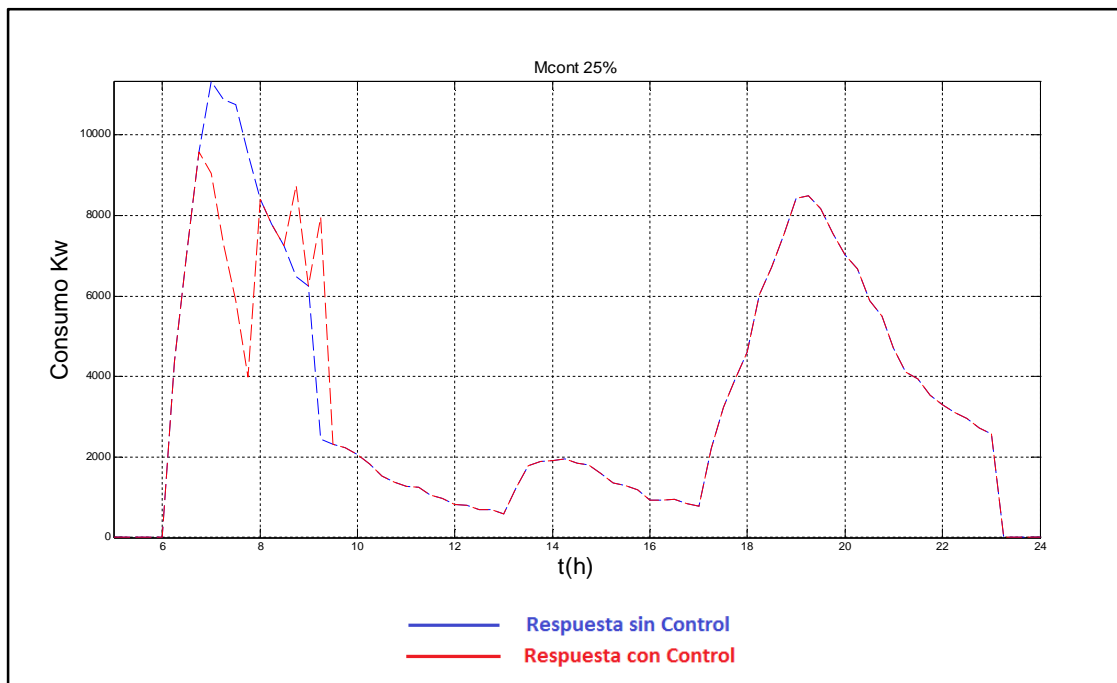


Figura 5.36: Respuesta a Mcont=25% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

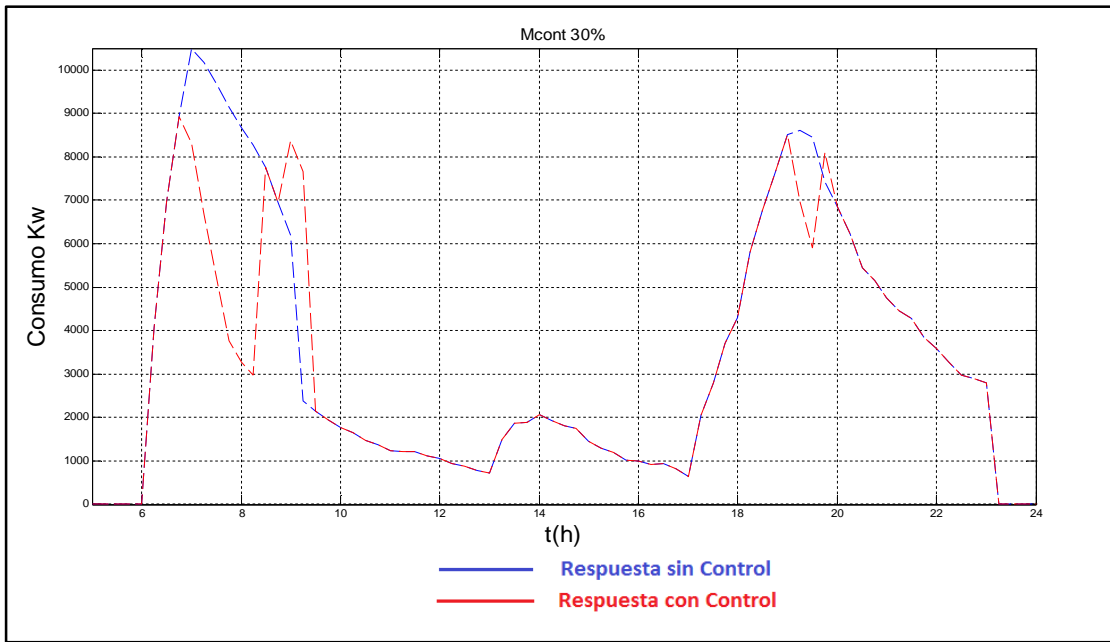


Figura 5.37: Respuesta a Mcont=30% Día Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

Las cargas resultantes para los días No Laborables en estaciones frías para diferentes valores de contingencias, con duración de 24 horas, se muestra en las figuras 5.38, 5.39, 5.40, 5.41, 5.42 y 5.43.

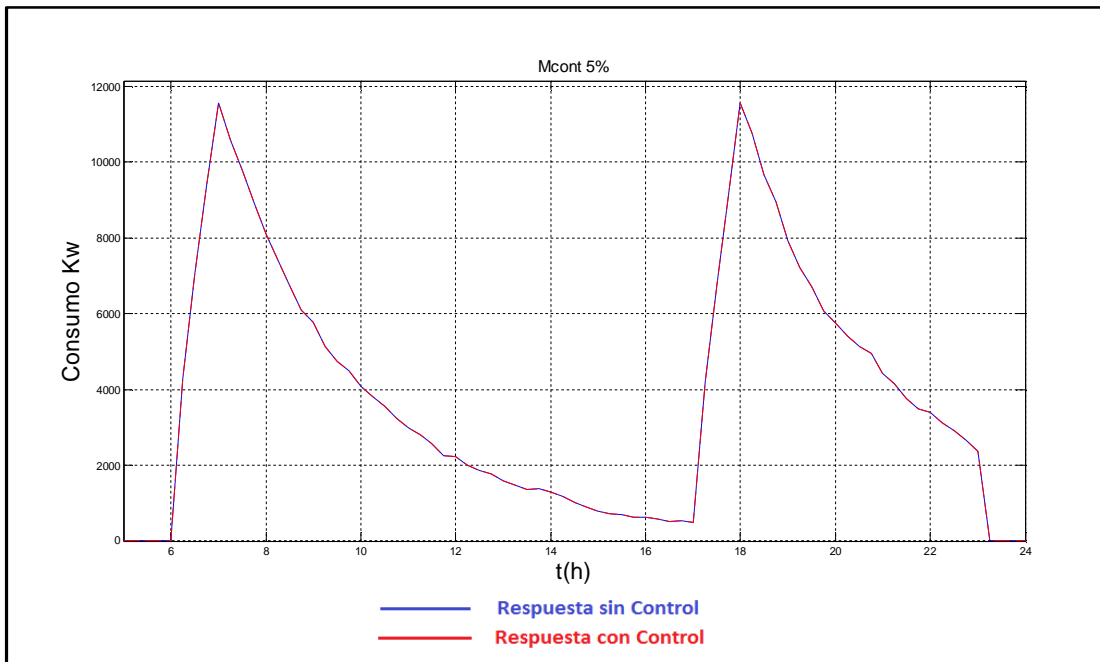


Figura 5.38: Respuesta a Mcont=5% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

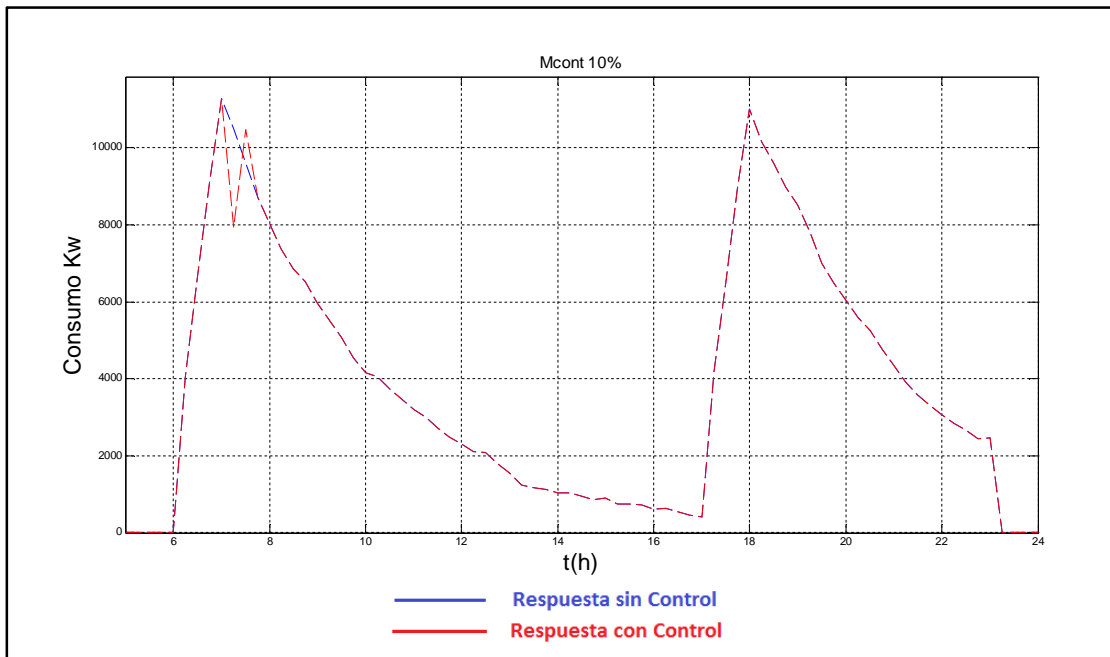


Figura 5.39: Respuesta a Mcont=10% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

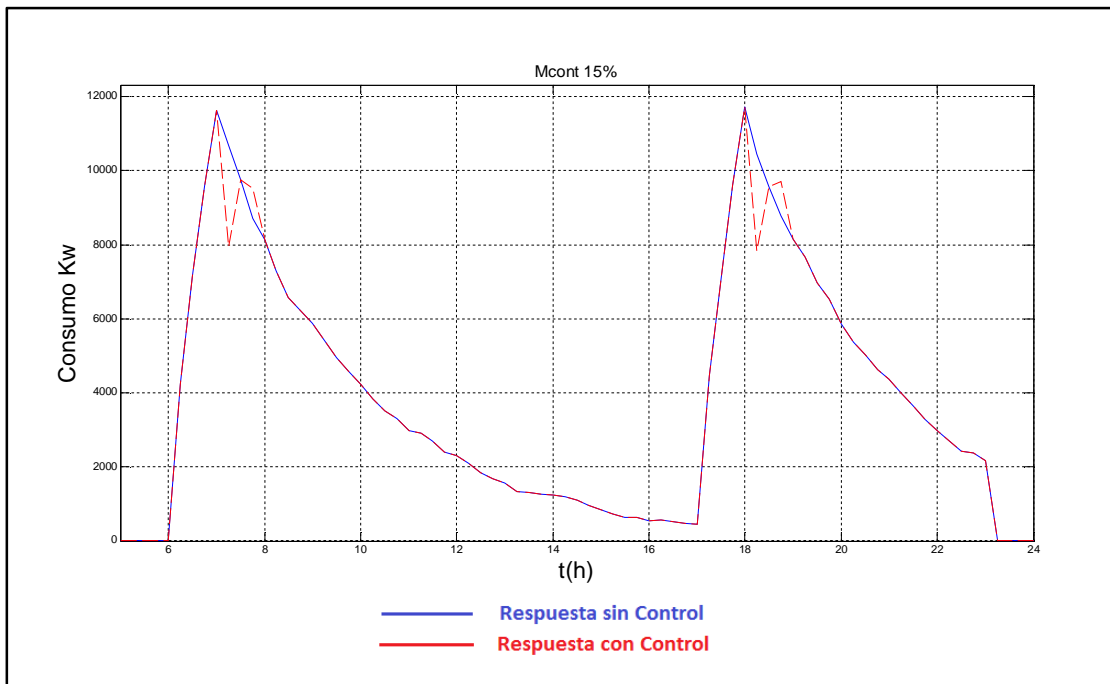


Figura 5.40: Respuesta a Mcont=15% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

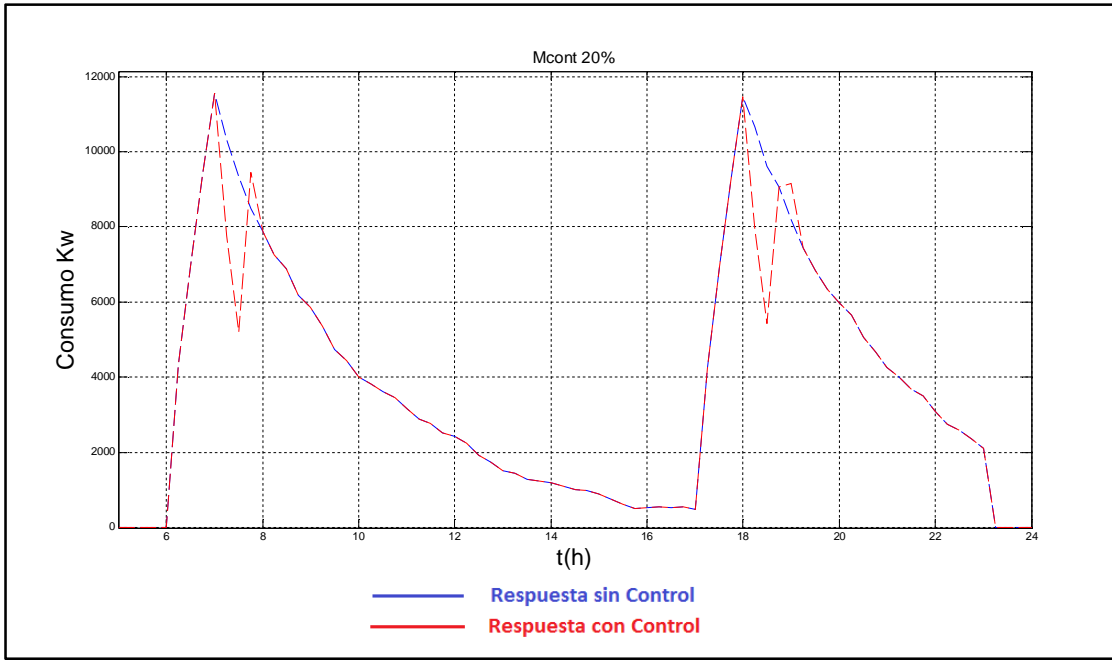


Figura 5.41: Respuesta a Mcont=20% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

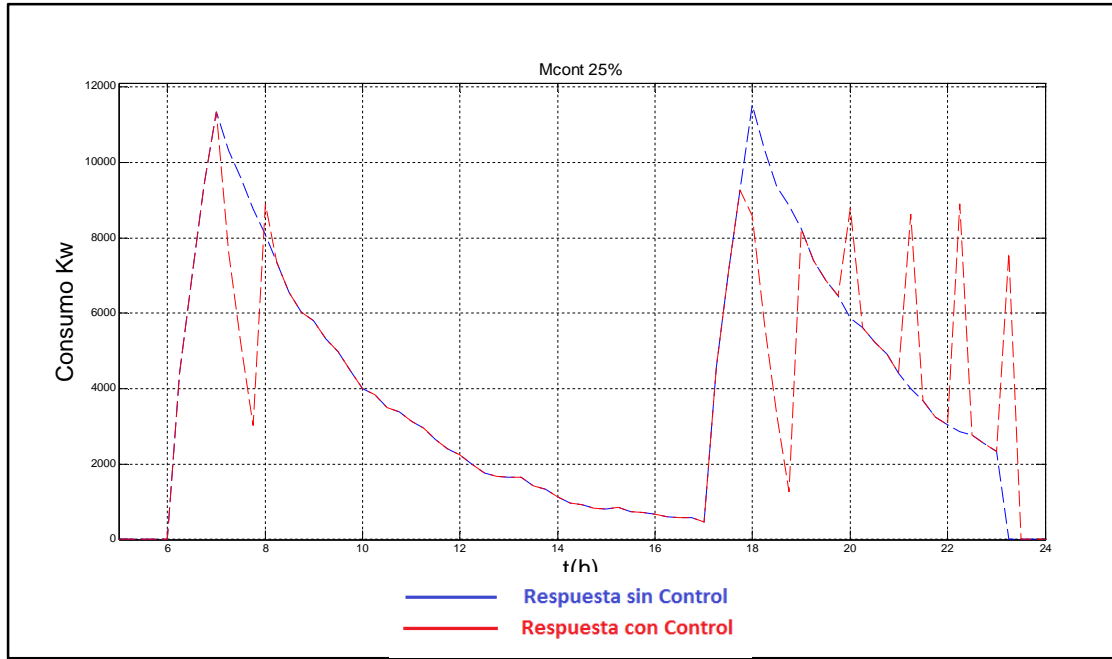


Figura 5.42: Respuesta a Mcont=25% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

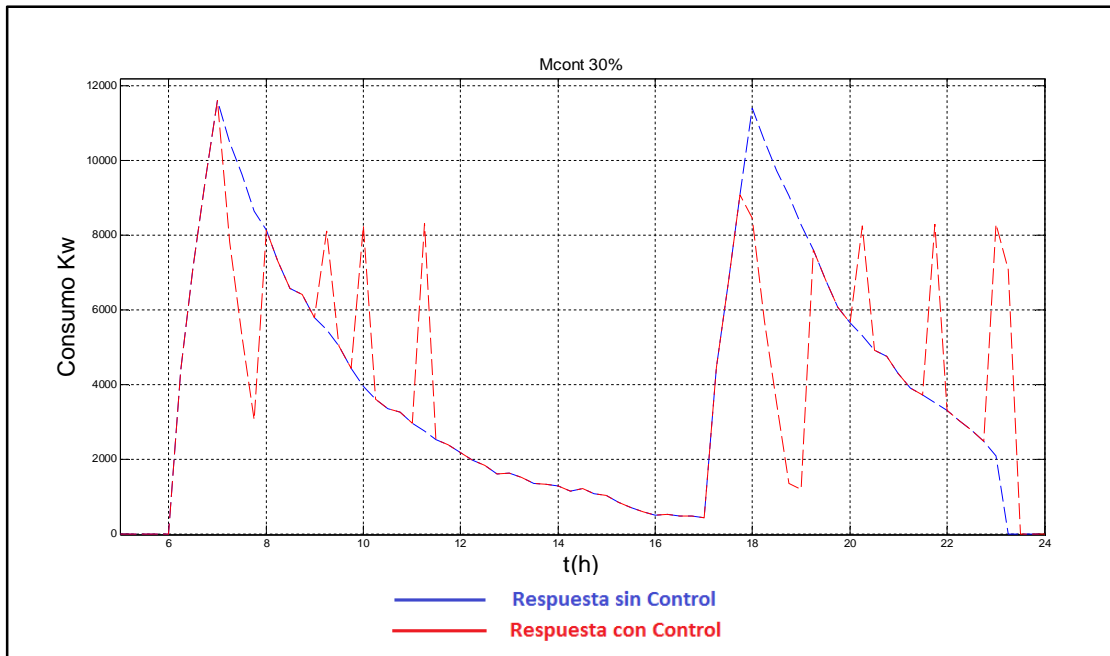


Figura 5.43: Respuesta a Mcont=30% Día No Laborable Frío. Fuente: Elaboración Propia.

Las gráficas muestran la respuesta del control para todos los tipos de días. La condición más crítica se da para los días no laborables con estación fría. Con un factor de seguridad de aproximadamente 10%, las fluctuaciones ante contingencias de amplia duración, influye en periodos cortos del día, fuera de los cuales, el comportamiento eléctrico se mantiene invariable. La histéresis exige mayor seguridad al control para poder detener las acciones de control y las reposiciones se dan en el mismo orden en el que los electrodomésticos fueron inhibidos, y únicamente, cuando su efecto no se traduzca en un incremento de la potencia consumida a niveles mayores que la potencia de contingencia.

Para estaciones cálidas, especialmente en días laborables, las contingencias que soporta el sistema pueden ser de mayor magnitud sin que esto signifique cambios importantes en la curva de carga.

Para la estimación del impacto sobre el *comfort* del usuario, es necesario calcular la cantidad de veces que un usuario sería inhibido y el promedio de duración de las inhibiciones. Los valores son calculados así:

$$Q_{inh,p,j} = Q_{inh} * prob_{contj} * \frac{Q_{días_esp}}{Q_{pob_tg}} \quad (5.1)$$

$$T_{inh,p,j} = T_{inh} * prob_{contj} * \frac{Q_{días_esp}}{Q_{pob_tg}} * dur_{int} \quad (5.2)$$

Donde:

- $Q_{inh,p,j}$: Cantidad de inhibiciones/año del poblador p de la contingencia tipo j.
- Q_{inh} : Cantidad de inhibiciones totales en la contingencia tipo j.
- $Prob_{contj}$: Probabilidad de ocurrencia de contingencia tipo j en el año.
- $Q_{días_esp}$: Cantidad de días del tipo analizado.
- Q_{pob_tg} : Cantidad de población *target*.
- $T_{inh,p,j}$: Cantidad de periodos de inhibición para poblador p de la contingencia tipo j al año.
- T_{inh} : Cantidad de periodos de inhibición en la contingencia tipo j.
- Dur_{int} : Duración de intervalos de simulación.

Para los cálculos, se utiliza información de las tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y de la figura 4.1. Los valores calculados para los impactos, por tipo de día al año, se muestran en las tablas 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16:

Tabla 5.13: Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Cálida.

| Días Laborables Estación Cálida | | | | | | |
|--|-------|------|------------|-----------|----------|----------|
| Q _{pobtg} = 4430; Dur _{int} =15min | | | | | | |
| Mcont | Q inh | Tinh | Prob contj | Qdías_esp | Qinh,p,j | Tinh,p,j |
| 5% | 0 | 0 | 0.27 | 120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10% | 0 | 0 | 0.33 | 120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 15% | 0 | 0 | 0.25 | 120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 20% | 0 | 0 | 0.11 | 120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 25% | 430 | 3 | 0.05 | 120 | 0.6382 | 0.0668 |
| 30% | 1380 | 3 | 0.03 | 120 | 1.0242 | 0.0334 |

Tabla 5.14: Impacto al usuario final en Días No Laborables – Estación Cálida.

| Días No Laborables Estación Cálida | | | | | | |
|---|--------------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Qpobtg= 4430; Dur_int=15min | | | | | | |
| Mcont | Q inh | Tinh | Prob contj | Qdías_esp | Qinh,p,j | Tinh,p,j |
| 5% | 0 | 0 | 0.27 | 63 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10% | 0 | 0 | 0.33 | 63 | 0.0000 | 0.0000 |
| 15% | 0 | 0 | 0.25 | 63 | 0.0000 | 0.0000 |
| 20% | 2522 | 3 | 0.11 | 63 | 3.9305 | 0.0701 |
| 25% | 4315 | 6 | 0.05 | 63 | 3.3624 | 0.0701 |
| 30% | 5332 | 6 | 0.03 | 63 | 2.0775 | 0.0351 |

Tabla 5.15: Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Fría.

| Días Laborables Estación Frío | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Qpobtg= 4430; Dur_int=15min | | | | | | |
| Mcont | Q inh | Tinh | Prob contj | Qdías_esp | Qinh,p,j | Tinh,p,j |
| 5% | 0 | 0 | 0.27 | 120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10% | 281 | 2 | 0.33 | 120 | 2.5025 | 0.2672 |
| 15% | 547 | 3 | 0.25 | 120 | 3.6535 | 0.3006 |
| 20% | 683 | 3 | 0.11 | 120 | 2.0275 | 0.1336 |
| 25% | 1622 | 5 | 0.05 | 120 | 2.4075 | 0.1113 |
| 30% | 2403 | 12 | 0.03 | 120 | 1.7834 | 0.1336 |

Tabla 5.16: Impacto al usuario final en Días Laborables – Estación Fría.

| Días No Laborables Estación Frío | | | | | | |
|---|--------------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Qpobtg= 4430; Dur_int=15min | | | | | | |
| Mcont | Q inh | Tinh | Prob contj | Qdías_esp | Qinh,p,j | Tinh,p,j |
| 5% | 603 | 2 | 0.27 | 63 | 0.1088 | 0.0054 |
| 10% | 796 | 3 | 0.33 | 63 | 0.1723 | 0.0097 |
| 15% | 1021 | 4 | 0.25 | 63 | 0.1658 | 0.0097 |
| 20% | 2686 | 6 | 0.11 | 63 | 4.1861 | 0.1403 |
| 25% | 5672 | 9 | 0.05 | 63 | 4.4199 | 0.1052 |
| 30% | 7879 | 10 | 0.03 | 63 | 3.0698 | 0.0584 |

Los resultados muestran que el mayor impacto para el usuario final se da en días no laborables en estación fría. De acuerdo con la tabla 6.16; un usuario promedio tendría 4.4 inhibiciones con duraciones de 15 minutos (los tiempos se convierten a enteros por los intervalos de simulación) en el peor de los casos. La cantidad de inhibiciones depende no sólo de la magnitud y duración de la contingencia, sino que también dependerá de los valores de consumo particulares del día; lo que a su vez determina la cantidad de tiempo en los que el control deberá actuar y el momento en el que la carga inhibida podrá ser desplazada.

Los efectos totales al año sobre el consumidor promedio se hayan de la suma de los valores para cada tipo de contingencia. Para 30%, por ejemplo, un consumidor promedio tendrá un total de 8 inhibiciones al año con una duración aproximada de 24 minutos en total de espera para retoma de carga. Para las mismas características de contingencia, en un día laborable cálido, la cantidad que un usuario promedio sería inhibido es de 1.0242 al año veces con una duración de 15 minutos. Bajo esta perspectiva, sería posible manejar valores máximos de contingencia permitidos para estaciones cálidas sin que eso signifique incidir negativamente en el *confort* del consumidor.

El factor de seguridad de simulación es de aproximadamente 3% (la potencia máxima estimada fue de 11.73kW y la potencia nominal de entrega se considera como 12kW; a fin de evaluar el control para las peores condiciones de trabajo. Un margen mayor de seguridad, como el que normalmente existe en los sistemas eléctricos, daría un margen mayor de magnitudes de contingencia posibles antes de que el efecto sea percibido por el usuario, i.e. comiencen las inhibiciones. Si las condiciones de diseño de alimentación eléctrica del sistema fuese mayor, i.e. mayor factor de seguridad, el impacto al consumidor podría reducirse; de tal forma que el efecto de la contingencia máxima sea conocido y estipulado en un contrato con el usuario final.

La duración de la contingencia simulada es de 24 horas, para permitir el análisis del efecto de control también en horas punta y representa un condicional de caso extremo tomado en cuenta como parte de simulaciones tipo 'peor de los casos'.

Naturalmente, para todos los casos, las condiciones extremas de contingencia generan un efecto mayor sobre el usuario, aunque la probabilidad de ocurrencia se reduce con la magnitud de la misma, de manera exponencial.

Una forma de mejorar el control del cliente o poder ponderar los días en los que, pese al contrato, él requiera la utilización de sus electrodomésticos y no le sea posible esperar, sería mediante la incorporación de una variable adicional llamada 'disponibilidad',

con la cual el usuario inhibe el control antes de que este ocurra. Para mantener los grados de predicción de carga y niveles de control por parte de la empresa distribuidora, esta variable debería ser claramente definida, especificada y limitada en el contrato con el cliente.

5.4. Análisis de la Viabilidad de Implementación del Control Propuesto

La viabilidad de un proyecto está basada en diversos factores ponderados de acuerdo a los objetivos que se planteen. Desde el punto de vista de un sistema eléctrico con enfoque en el usuario final, es necesario incluir un parámetro que indique cual sería el nivel de 'perturbación' al que sería expuesto.

En el apartado 5.3 se mostraron los resultados para diversos valores de contingencias en el peor de los casos, es decir, con duración de un día completo. De acuerdo con los resultados, el impacto sobre el usuario es reducido y, por tanto, se predice una menor resistencia de aceptación de afiliación al programa.

En cuanto a la infraestructura necesaria para la implementación del sistema de control propuesto, puede dividirse en tres grandes grupos:

- **Hardware:** Todos los dispositivos físicos que se instalarían en los electrodomésticos de las casas y en los puntos de distribución.
- **Software:** Está referido a la plataforma requerida para centralizar la información, almacenar los datos y realizar los cálculos. Incluye también la herramienta para calcular los precios en tiempo real.
- **Comunicación:** Incluye el medio por el cual se transmiten los datos entre la casa y la central de la empresa distribuidora.

El hardware requerido para la implementación a nivel de casas es similar al utilizado para el control remoto de las viviendas vía *Web* con la domótica. La diferencia con estos sistemas es sólo que el usuario no es quien realiza el control, sino la empresa de distribución. Al igual que en las casas domóticas, se utilizarían equipos de corte de carga de comunicación inalámbrica de corto alcance para intercambiar información entre sí y con una interfaz centralizadora compatible con el protocolo *Ethernet*, para su salida a *Internet*, como se verá más adelante. Estos sistemas existen en el mercado y son

utilizados con otras aplicaciones. El hardware requerido para los puntos de distribución se comunicaría inalámbricamente, mediante radiofrecuencia con las centrales distribuidas en la casa. Las comunicaciones con antenas están desarrolladas ampliamente a nivel local. La centralización de esta información hacia la empresa distribuidora podría representar la mayor inversión requerida, puesto que serán requeridas medidas para asegurar la transmisión de datos sin interrupciones por climas o por robos. A este nivel, se recomendaría el uso de fibra óptica.

La complejidad de la implementación del software recae en el desarrollo de una plataforma confiable de rápida respuesta y servidores con respaldo para el manejo de las bases de datos. Actualmente, son diversas las empresas que interactúan con sus clientes con plataformas *Web*, por lo que la implementación a este nivel es viable.

Puesto que la premisa de este trabajo contempla el aprovechamiento del hardware disponible por el cliente, se propone la transmisión de datos vía Internet bajo el protocolo SNMP, *Simple Network Management Protocol*, para lo cual se requieren interfaces actualmente disponibles en el mercado. Por tanto, aunque no se contempló en este trabajo como criterio de selección del público *target*, ni existe una relación necesaria, serían mucho más atractivos para el programa aquellos usuarios que tengan implementada una línea telefónica y/o un servicio de internet; esto con el fin de aprovechar los medios disponibles en la transmisión de datos sin inferir en costos adicionales. Esta decisión se sustenta también en la limitada información que requiere transferirse así como la frecuencia, relativamente baja, de veces requerida.

Por tanto, la implementación piloto de programas DSM centralizados para el control de las cargas, tiene un componente que requiere especial atención, siendo viable con la tecnología disponible actualmente.

Conclusiones y Recomendaciones

- En Lima sería posible aplicar el control directo de cargas centralizado para lograr una reducción de hasta 30% en la potencia nominal suministrada, bajo condiciones de operación estrechas (3% de margen de seguridad), significando, en el peor de los casos, 4.4 inhibiciones de 15 minutos al año en días no-laborables fríos para un usuario promedio.
- Bajo las mismas condiciones de contingencia, para los demás días del año, las inhibiciones máximas serían de 3.93, con duración de 15 minutos, al año, para un usuario promedio.
- Para el cálculo exacto de márgenes disponibles para el control DSM en cada punto de distribución, es necesario el levantamiento de información específica referente a los hábitos de consumo, patrones de tenencia, patrones de permanencia y hábitos energéticos de sus consumidores 'suministrados'.
- La combinación de un control directo de cargas centralizado y el control distribuido por parte de los clientes, podría incluirse mediante la adición de una variable denominada "disposición". Esta variable habilitaría a la carga para el ingreso al control, y si se encontrara definida y limitada explícitamente en el contrato, permitiría mantener aún la predictibilidad para la empresa distribuidora.
- En función de los estilos de vida de los usuarios, es necesaria la creación de estrategias gubernamentales que incentiven la afiliación y permanencia en los programas de manera efectiva. Dado que la elasticidad a los precios se reduce con el incremento de los ingresos, se hace necesario que las estrategias apunten a las motivaciones puntuales de cada sector. Los programas de concientización y marketing serán de suma importancia, de acuerdo a lo evidenciado en experiencias internacionales.
- La claridad en las condiciones contractuales para cada usuario, expresada en factores de comodidad limitadas en tiempo de duración, magnitud de impacto y frecuencia de ocurrencia; es de crucial importancia para la predictibilidad para ambas partes; sobre todo para las operaciones de la empresa distribuidora que

conocerá de antemano, la capacidad disponible de corte de carga con la que dispone.

- Los programas de control de cargas distribuido, basado en precios en tiempo real son la etapa ideal de los sistemas DSM, cuando los usuarios conocen todas las funcionalidades y están dispuestos a tomar acción para reducir su demanda en horas de altos precios de la electricidad. Si bien, esto reduce la predictibilidad para la empresa distribuidora, proporciona mayor flexibilidad al usuario e incrementa su probabilidad de permanencia en el programa. Esta etapa requiere de una inversión en infraestructura técnica adicional para la medición en tiempo real, plataformas Web de información, entre otros; y no debería plantearse, con esperanza de éxito, sin una 'culturización' energética real de los consumidores.
- Las recomendaciones para la optimización de este trabajo incluyen una mayor frecuencia para el modelamiento y el control, en función a los límites técnicos y económicos permitidos; la búsqueda de la relación entre los niveles culturales y socioeconómicos con el uso de la energía para su inclusión en el modelo y la consideración de las variaciones de las curvas de carga durante los fines de semana.

Referencias Bibliográficas

- [1] “Manejo de la Demanda y Smart Metering en sistemas hidroeléctricos”, Van Campen B., Osinergmin conferencia en Perú, octubre 2011.
- [2] “Primer on Demand-Side Management”, Charles River Associates, Oakland USA, febrero 2005.
- [3] “A National Assessment of Demand Response Potential”, Faruqui A., George S. y Rohmund I., Staff report, The Brattle Group, Freeman Sullivan & Co y Global Energy Partners, LLC, junio 2009.
- [4] “La Focalización es Relevante: Propuesta de un Esquema Óptimo de Subsidios al Consumo Eléctrico Residencial e Impactos Sociales de su Implementación”, Franco J. M., Aragon G., Proyecto Breve Abierto CIES 2010. Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico, diciembre 2010.
- [5] “Evolución de Indicadores del Mercado Eléctrico 1995 – 2011”, MiNEM, Ministerio de Energía y Minas del Perú, febrero 2012.
- [6] “Métodos y Modelos para la Gestión de Cargas Eléctricas Residenciales en Redes de Distribución”, Molina G. A., Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cartagena, 2002.
- [7] “A Model of UK Domestic Appliance-Use Using ARTIFICIAL Neural Networks”, Lim D., University of Reading, UK, agosto 2011.
- [8] “Three-Dimensional Model of Residential Energy Consumer Archetypes for Local Energy Policy Design in the UK”, Zhang T., Siebers P-O., Aickelin U., University of Nottingham, School of Computer Science, 2011.

- [9] "Dynamic Energy-Consumption Indicators for Domestic Appliances Environment, Behaviour and Design", Wood G., Newborough M., *Energy and Buildings* (35), pp 821-841, 2003.
- [10] "Human Factors in Appliance Energy-Consumption", Fechner J. V., *Proceedings of the IEEE Appliance Technical Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1977.
- [11] "Energy Use the Human Dimension", Stern P. C., Aronson E., W.H. Freeman and Company, New York, 1984.
- [12] "A Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Building in the UK", Yao R., Steemers K., *Energy and Building* (37), pp 663-671, 2005.
- [13] "Energy-Consumption in UK Households: Impact of Domestic Electrical Appliance", Mansouri I., Newborough M., Probert D., *Applied Energy* 54 (3) , pp 211–285, 1996.
- [14] "Investigating the Impact of Demand Side Management on Residential Customers", Zhang N., Ochoa L. F., Kirschen D., UK's Engineering and Physical Sciences Research Council, enero 2008.
- [15] "Demand Side Management: Benefits and Challenges", Strbac G., *Energy Policy* (36), pp 4419-4426, 2008.
- [16] "Análisis de los Hábitos de Consumo", CENTROSUR, Ecuador 2011. Departamento de la Calidad de la Dirección de Planificación de la Empresa Eléctrica Regional.
- [17] "Sustainable housing design: an integrated approach", Marsh R., Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 1996.
- [18] "Centralized and Decentralized Control for Demand response", Shuai L., Samman N., Diao R., Pacific Northwest National Laboratory, IEEE 2011.
- [19] "Demand Side Management for Residential and Commercial End-Users", Bonneville E., Rialhe A., *Efficiency & Eco-Design*, mayo 2006.

- [20] “Estimación de la Demanda Residencial de Electricidad en el Perú”, Bendezú L. A., Tesis de Maestría, Universidad de Chile, 2009.
- [21] “Discrete/Continuous Models of Consumer Demand”, Hanemann M. W., *Econometría* (52), pp. 541-562, mayo 1984.
- [22] “LT Europe—An Integrated Energy Design Tool”, Baker N., Yao R., *Proceedings of the Design with the Environment PLEA 2002 Conference*, Toulouse France, pp. 669–673, 2002.
- [23] “A Simplified Thermal Resistance Network Model for Building Thermal Simulation, Sim2002, in: *Proceedings of the eSim*”, Yao R., Baker N., McEvoy M., pp. 135–140, Montreal, Canada, 2002.
- [24] “Análisis Económico de la Demanda de Electricidad en Hogares Peruanos”, Bendezú L.A., Gallardo J., OSINERG, Oficina de Estudios Económicos, Lima, diciembre 2006.
- [25] “Regulación de Tarifas de Distribución de Electricidad”, Pérez R., Reyes E., OSINERGMIN, Lima 2010.
- [26] “Perú Sector Eléctrico 2012”, MINEM, Documento Promotor, Ministerio de Energía y Minas, 2012.
- [27] “Perú Subsector Eléctrico 2012”, MINEM – Documento Promotor, Dirección general de Electricidad, 2012.
- [28] “Evaluación del Fondo Social de Compensación Eléctrica – FOSE”, Gallardo J., Bendezú L., Oficina de Estudios Económicos OSINERG, febrero 2005.
- [29] “Food Subsidies and Poverty Alleviation”. Besley, T. y Kanbur R, *The Economic Journal*, 1988.
- [30] “The Power of Five Percent”, Faruqui A., Hledik R., Newell S., Pfeifenberger J., The Brattle Group, mayo 2007.

- [31] "A Method of Formulating Energy Load Profile for Domestic Buildings in the UK", Yao R., Steemers K., Energy and Buildings (37), pp 663-671, 2005.
- [32] "Demand-Side Management Strategies and the Residential Sector: Lessons from International Experience", Haney B. A., Jamasb T., Platchkov L. M., Cambridge Working Paper in Economics 1060, University of Cambridge, noviembre 2010.
- [33] "Assessment of Policy Instruments for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Buildings", Koepfel S., Urge-Vorsatz D., Budapest, Hungary: Central European University. 2007.
- [34] "Achieving Controllability of Electric Loads", Duncan S. Callaway, Ian A. Hiskens., Proceedings of the IEEE, enero 2011.
- [35] "Markets Consumers Could Benefit from Demand Programs, but Challenges Remain", Senate U. S., Report to the Chairman, Committee on Governmental Affairs, U.S. Senate, USA 2004.
- [36] "Household Response to Dynamic Pricing of Electricity – Survey of the Experimental Evidence", Faruqi A., Sergiei S., The Brattle Group, California 2009.
- [38] GE Energy, Conferencia Compañía General Electric, Lima 2009.
- [39] "Planning the Evolution of the Distribution Smart Grid", Ault G., Smart Grids Research Symposium, University of Strathclyde Engineering, 2010.
- [40] <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/gridlabd>
- [41] "Guía N°1 Elaboración Proyectos de Guías de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético del Sector Residencial". Dirección General de Electricidad MEM, mayo, 2008.
- [42] "Guía Energética de Consumo Residencial y Eficiencia Energética". Oficina de Comunicaciones de OSINERGMIN, julio 2011.