

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Tecnologías de Información

Programa de Graduados



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA
ADAPTADO AL SISTEMA TARIFARIO MEXICANO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER

EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

POR:

CORNELIO CONTRERAS HINOJOSA

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2012

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE DEMANDA DE ENERGÍA
ELÉCTRICA ADAPTADO AL SISTEMA TARIFARIO MEXICANO

POR:

CORNELIO CONTRERAS HINOJOSA

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

Presentada al Programa de Graduados de la Escuela de Ingeniería y Tecnologías de
Información

Este trabajo es requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con
Especialidad en Ingeniería Energética

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE MONTERREY

DICIEMBRE DE 2012

Contenido

1	Resumen.....	1
2	Antecedentes	2
3	Definición del problema.....	4
4	Objetivo.....	6
5	Fundamentos	7
5.1	Definiciones.....	7
5.2	Esquema de facturación de CFE	9
5.2.1	Tarifa O-M	9
5.2.2	Tarifa H-M.....	12
5.3	Teoría Series en el tiempo.....	15
5.3.1	Método de pronóstico suavización exponencial simple.....	16
5.3.2	Análisis del efecto de suavización exponencial sobre series de potencia instantánea.....	17
5.4	Pronóstico de la demanda en un intervalo de 15 minutos.....	24
5.4.1	Cálculo de la demanda en el medidor ION8500 de Schneider Electric	31
5.5	Hardware y software	33
5.5.1	Selección del microcontrolador.....	33
5.5.2	Selección del software	33
6	Diseño e implementación del sistema controlador de demanda.....	35
6.1	Descripción de su funcionamiento	35
6.2	Diagrama de bloques del controlador	36
6.3	Medición del consumo de energía	36
6.4	Etapa de entrada de los pulsos del controlador de demanda.....	37
6.5	Descripción del microcontrolador	38
6.6	Conexión del micro con el display y el teclado	38
6.7	Comunicación serial I2C.....	39
6.8	Comunicación RS-232.....	40
6.9	Sección de potencia.....	41
6.10	Circuito del controlador de demanda	43
6.11	Tarjetas de circuito impreso (PCB) del controlador demanda.....	43
6.12	Modificación del medidor de energía	44
6.13	Tablero de cargas	45
6.14	Prototipo final del controlador de demanda	46
7	Operación del controlador de demanda.....	47

7.1	Medición de energía	47
7.2	Cálculo de la demanda pronosticada	50
7.3	Demanda máxima y holgura permitida	53
7.4	Demanda máxima registrada	54
7.5	Conexión de cargas al controlador de demanda	55
7.6	Asignación de la potencia a cada carga	56
7.7	Asignación de prioridad en el control de las cargas	57
7.8	Activación del control de las cargas por demanda (prioridad)	57
7.9	Señal de alarma para detectar que la demanda pronosticada es mayor a la máxima	58
7.10	Programación del controlador a través de eventos	59
7.11	Control manual de encendido y apagado de las cargas	60
7.12	Encendido o apagado de todas las cargas en forma simultánea	61
7.13	Algoritmo de control para las cargas en función de la demanda	62
7.14	Detalles de los diferentes modos de operación de control de cargas	68
7.14.1	Control por prioridad de la carga "i"	68
7.14.2	Control por horario de la carga "i"	68
7.14.3	Dentro de la zona activada por prioridad se activa una zona activada por horario	69
7.14.4	Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma parcial.....	69
7.14.5	Zona de prioridad dentro de una zona de por horario	70
7.14.6	Traslape del control manual con el control por demanda o por horario.....	70
8	Programación y comunicación del controlador de demanda con la computadora	72
8.1	Programación de los eventos	72
8.2	Pantalla de captura de eventos	72
8.3	Graficador en el tiempo de los eventos programados	76
8.4	Transmisión de los eventos entre el controlador de demanda y el PC.....	78
8.5	Información recopilada durante el control de demanda	79
8.6	Transmisión de la información recopilada al computador	82
8.7	Generación de las gráficas en Excel.....	84
9	Análisis y resultados	87
9.1	Análisis del efecto de no contar con la señal de fin de subintervalo de cada 5 minutos del medidor de CFE	87
9.2	Resumen de la operaciones que realiza el controlador de demanda.....	91
9.3	Ejemplos de operación del controlador de demanda	93
9.3.1	Ejemplo de control de cargas por horario	93
9.3.2	Ejemplo de control por horario con encendido y apagado de cargas en forma manual	94
9.3.3	Ejemplo de control por demanda con traslape por horario.....	95
9.3.4	Ejemplo de control de cargas por demanda	97
9.4	Efecto del valor de alfa en el control por demanda (prioridad).....	100

10 Comentarios y conclusiones	103
11 Recomendaciones para trabajos futuros	105
12 Anexo 1. Manual de operación	106
12.1 Teclado.....	106
12.2 Pantalla principal.....	106
12.3 Pantalla de la demanda máxima registrada.....	107
12.4 Pantalla para el control ON/Auto/OFF de cada una de las cargas	107
12.5 Sección de ajustes.....	108
12.6 Pantalla inicial de la sección de ajustes.....	108
12.7 _kW/pdad	109
12.8 _Otros.....	109
12.9 _Reloj	110
12.10 _Salir	110
12.11 _Paramet.....	110
12.12 _Dat PC.....	111
12.13 _Eventos	111
12.14 _Nvo	112
12.15 _Ver/Edit.....	112
12.16 _LeerPC	113
12.17 Todos los ajustes anteriores en forma gráfica	113
13 Bibliografía	115

Tabla de figuras

Figura 1 Costos de demanda (\$/kW) y de energía (\$/kWh) en CFE.....	3
Figura 5-1. Curva de demanda eléctrica durante un día.	8
Figura 5-2 Curva de demanda y curva ideal de demanda.....	8
Figura 5-3. Componentes que incluyen el cobro en la tarifa O-M de CFE.....	10
Figura 5-4. Medición de la demanda en intervalos de 15 minutos.	11
Figura 5-5. Costos del kW de demanda y del kWh de energía consumida.	11
Figura 5-6. Componentes que incluyen el cobro en la tarifa H-M de CFE.....	13
Figura 5-7. Factores de reducción de los horarios intermedio y base.....	14
Figura 5-8. Factores de cargo por demanda facturable y por energía consumida.....	14
Figura 5-9. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$	18
Figura 5-10. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$	18
Figura 5-11. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$	19
Figura 5-12. Gráfica de la suma de los errores al cuadrado con respecto a α	20
Figura 5-13. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$	21
Figura 5-14. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$	21
Figura 5-15. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$	21
Figura 5-16. Gráfica de las variaciones obtenidas con respecto a α	22
Figura 5-17. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$	23
Figura 5-18. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$	23
Figura 5-19. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$	23
Figura 5-20. Gráfica de la suma de los errores al cuadrado con respecto a α	24
Figura 5-21. Áreas involucradas para calcular la demanda.....	25
Figura 5-22. Gráfica del consumo de potencia durante un día laboral.	26
Figura 5-23. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con $\alpha=0.1$	27
Figura 5-24. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con $\alpha=0.5$	28
Figura 5-25. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con $\alpha=0.9$	29
Figura 5-26. Gráficas de la variación estándar entre la potencia real y la pronosticada.	30
Figura 5-27. Gráficas de las variaciones entre demandas pronosticadas y la real.	31
Figura 5-28. Áreas que involucran el cálculo de la demanda.....	32
Figura 6-1. Medición de la demanda en intervalos de 15 minutos.	35
Figura 6-2. Diagrama de bloques del controlador de demanda	36
Figura 6-3. Medidor trifásico de energía utilizado en el proyecto.	37
Figura 6-4. Circuito convertidor de pulsos a cambio de nivel de voltaje.	37
Figura 6-5. Los pulsos del medidor se convierten en cambios de nivel de voltaje.....	38
Figura 6-6. Tipos de microcontroladores de Microchip.....	38

Figura 6-7. Conexión del micro con el display y el teclado.....	39
Figura 6-8. La comunicación entre componentes del micro es serial con el protocolo I2C.	40
Figura 6-9. Comunicación RS-232.....	41
Figura 6-10. Conexión entre el expansor (U2) y el amplificador (U4).	42
Figura 6-11. Control de los relevadores.	43
Figura 6-12. Circuito del controlador de demanda.....	43
Figura 6-13. Tarjeta impresa con solo los componentes para cuatro cargas.	44
Figura 6-14. Tarjeta básica para uso de los microcontroladores PIC18 de Microchip.....	44
Figura 6-15. Modificación del medidor de energía.....	45
Figura 6-16. Tablero de carga con cuatro focos de 100 Watts.....	46
Figura 6-17. Prototipo total del proyecto.....	46
Figura 7-1. Pulsos que han llegado en el intervalo actual de 15 segundos.....	47
Figura 7-2. Potencia promedio en el último intervalo de 15 segundos.....	48
Figura 7-3. Cientos de pulsos que genera el medidor de energía utilizado. Para el caso de 100 pulsos/kWh el valor es $K=1$	49
Figura 7-4. Factor de amortiguamiento α	50
Figura 7-5. Variación de la potencia P_t contra la variación de la potencia pronosticada P_{prot} con un valor de alfa igual a 0.3.	50
Figura 7-6. Gráfica del consumo de energía para tiempo t_i en un intervalo de 15min.	51
Figura 7-7. Demanda pronosticada y se actualiza cada 15 segundos.....	52
Figura 7-8. Tiempo que falta de los cinco minutos del tercer tercio del tiempo de demanda.....	53
Figura 7-9. Ajuste de la demanda máxima permitida por el controlador de demanda.....	53
Figura 7-10. Aplicación del parámetro holgura.	54
Figura 7-11. Ajuste de la holgura que utilizará el controlador de demanda.....	54
Figura 7-12. Valor de D_{maxreg} y la fecha de su última actualización.....	55
Figura 7-13. Circuito de potencia que controla hasta ocho cargas.	56
Figura 7-14. Asignación de potencia en kW en las cargas del 1 al 5.....	56
Figura 7-15. Asignación de potencia en kW en las cargas del 5 al 8.....	57
Figura 7-16. Asignación de prioridades a cada carga.....	57
Figura 7-17. Activación del control por demanda (prioridad).....	58
Figura 7-18. Señal de alarma si $D_{pro} > D_{max}$	58
Figura 7-19. Información que contiene cada evento programado.....	59
Figura 7-20. Teclas de izquierda, derecha y OK.....	60
Figura 7-21. Carga 5 en estado Automático.....	61
Figura 7-22. Carga 5 se encuentra encendida en forma manual.	61
Figura 7-23. Carga 5 se encuentra apagada en forma manual.....	61
Figura 7-24. Control del encendido o apagado de todas las cargas.	62
Figura 7-25. El controlador lleva contabilidad de los pulsos que han llegada en cada una de las tres subáreas de tiempo ya transcurridas.	63
Figura 7-26. Algoritmo de control exclusivo para las cargas activadas en función de la demanda.....	65
Figura 7-27. Algoritmo para encender una carga en función de la demanda.	66

Figura 7-28. Caso en que $Potmax > (Demmax-h)$.	67
Figura 7-29. Caso en que $Potmax < (Demmax-h)$ y además $Potmax > Ppron$.	67
Figura 7-30. Caso en que $Potmax < Ppron$.	67
Figura 7-31. Control por prioridad.	68
Figura 7-32. Control por horario.	69
Figura 7-33. Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma total.	69
Figura 7-34. Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma parcial.	69
Figura 7-35. Zona de prioridad dentro de una zona de por horario.	70
Figura 7-36. Estados posibles de las cargas: ON, OFF o Auto.	70
Figura 7-37. Paso de los estados ON/OFF al estado Auto. Caso de P.	71
Figura 7-38. Paso de los estados ON/OFF al estado Auto. Caso de T.	71
Figura 8-1. Ejemplo de una programación de eventos en la PC.	73
Figura 8-2. Información de un evento vista en el controlador.	73
Figura 8-3. Ejemplo de programación de eventos para la carga 1.	74
Figura 8-4. Ejemplo de programación de eventos para la carga 2.	74
Figura 8-5. Selección de la carga asignada en un evento.	74
Figura 8-6. Selección de encendido de la carga por prioridad (SI) o por horario (NO).	75
Figura 8-7. Selección de la fecha de encendido.	75
Figura 8-8. Selección del tiempo de encendido.	76
Figura 8-9. Botón de actualización de los eventos sobre la gráfica.	76
Figura 8-10. Programación de tres eventos sobre tres cargas diferentes.	77
Figura 8-11. Ejemplo de gráficas de la programación de los eventos.	77
Figura 8-12. Programación de tres eventos sobre tres cargas diferentes.	77
Figura 8-13. Gráficas de la programación de los eventos.	78
Figura 8-14. Botones de control para la comunicación con el controlador.	78
Figura 8-15. Pantalla de modo de comunicación.	78
Figura 8-16. Información que se almacena en memoria cada minuto.	80
Figura 8-17. Información que se almacena en memoria cada 5 minutos.	80
Figura 8-18. Información que se almacena en memoria cada hora.	81
Figura 8-19. Manejo de la memoria en el almacenamiento de información.	82
Figura 8-20. Controles que permiten la transmisión de la información recopilada.	82
Figura 8-21. Pantalla donde se solicita las horas de información a leer en el controlador.	83
Figura 8-22. Gráfica de la demanda pronosticada y de la demanda máxima.	83
Figura 8-23. Otros comandos de control del programa que captura la información.	83
Figura 8-24. Gráficas del estado de cada una de las cargas.	84
Figura 8-25. Información que se recibe del controlador de demanda.	85
Figura 8-26. Información ya procesada y lista para ser graficada.	85
Figura 8-27. Gráfica en el tiempo de la demanda máxima y de la demanda pronosticada.	86
Figura 8-28. La gráfica que muestra los intervalos de tiempo en que cada una de las cargas opera.	86

Figura 9-1. Variación en el consumo de potencia medido en kW durante un día.	87
Figura 9-2. Variación de la demanda promedio en intervalos de 15 minutos durante un día.....	88
Figura 9-3. Variación de la demanda en kW durante cinco horas.....	88
Figura 9-4. Demandas máximas obtenidas con diferentes desfasamientos.....	88
Figura 9-5. Variación en el consumo de potencia medido en kW durante un día.	89
Figura 9-6. Variación de la demanda promedio en intervalos de 15 minutos durante un día.....	89
Figura 9-7. Variación de la demanda durante cinco horas.	90
Figura 9-8. Demandas máximas obtenidas con diferentes desfasamientos.....	90
Figura 9-9. Ejemplo de programación de las cargas 1 a 4 por horario.	93
Figura 9-10. Resultados de la ejecución del control de cargas por horario.	94
Figura 9-11. Tabla de control de eventos por horario de las cargas 1 y 2.	94
Figura 9-12. Resultados en el tiempo del control de eventos por horario con encendido y apagado de cargas en forma manual.	95
Figura 9-13. Eventos en donde se activan las cargas 1 a 4 por demanda (prioridad).La carga 4 se traslapada por horario del minuto 5 al 9.....	96
Figura 9-14. Resultado de encender la carga 4 por horario dentro de su control por demanda.....	96
Figura 9-15. eventos en donde se activan las cargas 1,2,3 y 4 con control por demanda de las 20 horas hasta las 23 horas de todos los días de la semana.	97
Figura 9-16. Operación del controlador de demanda sobre cuatro cargas de 10kW cada una.....	99
Figura 9-17. La carga que se activa debe ser menor a la capacidad disponible.....	101
Figura 9-18. Incrementos en la potencia ante un escalón de 10kW y diferentes valores de alfa.	101
Figura 12-1, Teclado del controlador de demanda.	106
Figura 12-2. Pantalla principal del controlador.....	106
Figura 12-3. Pantalla donde se presenta la demanda máxima registrada y la fecha en que ocurrió.....	107
Figura 12-4. Pantallas en donde se define el estado ON/Auto/OFF de cada carga.	108
Figura 12-5. Al oprimir simultáneamente las dos teclas señaladas se entra a la sección de ajustes.	108
Figura 12-6. Pantalla donde se selecciona entre cargas/eventos/otros.....	108
Figura 12-7. Pantallas donde se actualiza el valor de cada carga conectada en kW.....	109
Figura 12-8. Pantalla para actualizar la prioridad asignada a cada carga.	109
Figura 12-9. Pantalla donde se selecciona entre Reloj/Parámetros/Transmisión a PC.....	109
Figura 12-10. Pantalla donde se actualiza la fecha.	110
Figura 12-11. Pantalla donde se define el tamaño de holgura.	110
Figura 12-12. Pantalla donde se define el factor de amortiguamiento.	110

Figura 12-13. Pantalla donde se define el valor del multiplicador Ka.....	111
Figura 12-14.- Pantalla en donde espera las horas que transmitirá al PC.....	111
Figura 12-15. Pantalla donde se selecciona el ver o editar los eventos.	111
Figura 12-16. Pantalla para generar un nuevo evento.....	112
Figura 12-17. Pantalla de selección de carga para ver sus eventos asociados.....	112
Figura 12-18. Pantalla de información por evento.	112
Figura 12-19. Pantalla de espera por transmisión o recepción de eventos.	113
Figura 12-20. Resumen de las pantallas que contiene el controlador de demanda.....	114

1 Resumen

El objetivo de la tesis fue el diseñar y construir un controlador de demanda orientado a la tarifa O_M de la CFE tratando de que fuera lo más versátil posible, de bajo costo, de fácil manejo y con facilidad de comunicarse a un computador. Este controlador de demanda facilita reducir en la tarifa O-M de la CFE el costo de facturación con respecto al rubro de demanda facturada. Esto se logra de dos formas, una es distribuyendo la operación de hasta ocho cargas eléctricas durante el transcurso del día y la segunda es controlando la operación de las mismas cargas pero sin rebasar una demanda máxima permisible establecida por el propio usuario y esto sin afectar la producción. El controlador también permite el ir almacenando la información generada en el tiempo de los cambios de la demanda de energía y de la operación de cada una de las ocho cargas. El controlador de demanda puede ser conectado a un computador ya sea para facilitar su programación o para transferir la información recolectada y con ella generar las gráficas correspondientes que facilitarán el análisis de la demanda en el tiempo o bien para obtener el perfil de la demanda de la empresa o de una zona en particular.

2 Antecedentes

Hoy en día, las empresas tienen que ser más eficientes ya que cada vez el ambiente de competencia está más globalizado. Una de las formas de ser más eficientes es a través de disminuir u optimizar el consumo de energía eléctrica. En México, muchas de las pequeñas empresas (tarifa H_M) ignoran la forma de cómo se realiza el cálculo de la factura de energía eléctrica por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Ignoran que el cobro se obtiene en base al consumo de energía activa (kWh), al consumo de energía reactiva (kVAh), al factor de potencia y de la máxima demanda (kW). Inclusive también ignoran el significado de los términos que CFE utiliza como es el de demanda máxima o demanda facturable. Esto les hace creer que la única forma de reducir los cobros de energía es utilizando menos las cargas con la penalización de disminuir su producción y operación. Desconocen totalmente el hecho de que el encender varias cargas en forma simultánea les puede ocasionar altos costos de energía. Normalmente estas empresas se enfocan solamente al ahorro en la energía activa y al mejoramiento del factor de potencia olvidándose de la demanda máxima y desconociendo que el cargo por esta demanda máxima puede llegar a representar de forma común entre un 20% y un 30% de su factura eléctrica. En un documento de la comisión de energía de Quintana Roo [1], se establece que: “Demanda Facturable: Representa entre un 25% y un 60% del costo total de la energía, dependiendo del tiempo de utilización y rutinas de operación que se sigan. Los intervalos de 15 minutos utilizados para la determinación de la demanda máxima ofrecen una posibilidad de control, ya que existe cierto tiempo disponible para apagar o reducir cargas que pueden estar contribuyendo al pico de demanda en el período de punta de CFE”.

Las pequeñas empresas saben que existen equipos electrónicos que les generarían ahorros en sus facturas eléctricas controlando sus cargas eléctricas, pero en contraparte ven que el equipo es muy sofisticado, que les va a costar mucho dinero y que además requerirán gente especializada para que maneje ese equipo. Todo esto hace que les dé miedo hacer la modernización y prefieren seguir como están.

Además, otra situación que complica el panorama, es que el costo de la energía eléctrica va incrementando año tras año. En la Figura 1, se presentan los costos por parte de CFE, de la energía eléctrica tanto por demanda facturable como por consumo de energía activa en los últimos 10 años para la tarifa H-M. Se observa en las gráficas como estos costos van siempre en fuerte aumento.

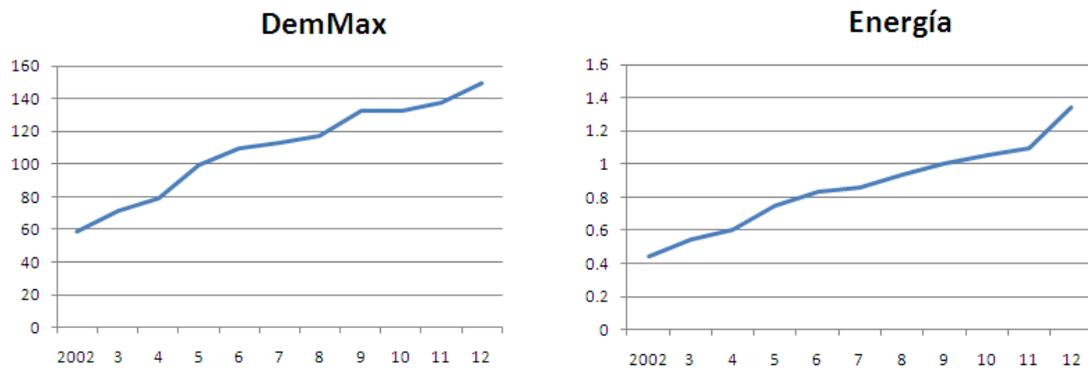


Figura 1 Costos de demanda (\$/kW) y de energía (\$/kWh) en CFE.

3 Definición del problema

En general, el problema a tratar es el de disminuir el cobro por demanda máxima (demanda facturable) en las facturas de energía eléctrica por parte de CFE en las empresas con tarifa O-M.

En el documento “Control de la demanda eléctrica” [2] de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) dice que “El control de la demanda eléctrica, se plantea como una alternativa de ahorro económico en sistemas ya eficientes, y se requiere que las personas que están aplicando este tipo de programas tengan un amplio conocimiento del proceso productivo de la empresa y su capacidad de flexibilidad”. También se comenta que “CFE ha ido modificando la estructura tarifaria a nivel nacional para dar una mayor gama de opciones a los diferentes segmentos de consumidores y establecer el precio a cada usuario”. En este mismo documento también se define el control de la demanda como: “Son aquellas medidas que tienden a limitar los niveles de demanda máxima facturable, en razón de los precios tarifarios”.

En el documento elaborado por la CONAE llamado “Metodología de Control de la Demanda Eléctrica” [3] se presenta una metodología para llevar a cabo el control de la demanda en una empresa y aquí se señala que “El objetivo de la metodología de control de la demanda es determinar los potenciales de reducción en la facturación eléctrica al aplicar medidas de control, manual o automático, que modifiquen los patrones de consumo y/o demanda eléctrica en período de punta”.

Para llevar a cabo el control y la operación de la demanda, básicamente lo que se tiene que hacer es controlar el encendido de las cargas tratando de que la demanda coincidente sea la menor posible. La otra forma es reprogramando las cargas para tratar de trasladar aquellas cargas que es posible mover a otro horario de operación para evitar empalmes que generen altos picos de consumo de energía. Por ejemplo, el consumir 50kWh en una hora comparado con consumir los mismos 50kWh en 10 minutos nos genera el mismo consumo de energía pero en el segundo caso el pico de demanda es seis veces mayor que en el primer caso. Por lo tanto se debe tratar de distribuir el encendido y la operación de las cargas tratando de que el pico de demanda máximo sea el menor posible.

Hay una frase de Peter Drucker que dice: “Todo lo que se puede medir, se puede mejorar”. Y es que al medir, se puede analizar y evaluar el comportamiento del sistema bajo estudio y por lo tanto se puede conocer en donde realizar cambios y mejoras a este sistema. Esto nos genera la necesidad de conocer y estudiar el comportamiento de consumo de energía en el tiempo ya sea a nivel carga o a nivel empresa.

El control de la cargas se puede realizar en forma preventiva, es decir, que con alarmas visuales o auditivas se generen alarmas indicando que se puede rebasar un valor máximo de demanda para que manualmente se prendan o se apaguen las cargas. También el control se puede realizar en forma predictiva, es decir, que en forma automática se trate de encender el máximo posible de cargas pero siempre sin rebasar un valor máximo de demanda especificado.

4 Objetivo

Diseñar y construir un controlador de demanda que permita controlar hasta ocho cargas ya sea en función de la demanda establecida o de acuerdo a un horario definido. Además contará con la capacidad de obtener el perfil de carga ya sea de la empresa o de una carga en particular. Debe poder comunicarse con un computador ya sea para que de ahí pueda ser programado o bien transferir la información recolectada sobre el consumo de energía durante el tiempo de control para poder ser analizada y servir como base a toma de decisiones futuras con respecto al consumo de energía. Su manejo debe ser simple y fácil de operar.

El objetivo de controlar ocho cargas en forma programada es el que se pueda trasladar la activación de ciertas cargas que el proceso permita a horarios de bajo consumo. El objetivo de poder controlar el encendido de las cargas en función de la demanda es poder tener encendidas el máximo de cargas posibles sin que exista el riesgo de rebasar una máxima demanda establecida por el usuario. En el momento que se detecte la posibilidad de rebasar la demanda máxima establecida se apagarán las cargas con menor prioridad y una vez que haya pasado la emergencia se comenzará a encender las cargas de mayor prioridad.

El objetivo de la recolección de información sobre el consumo de energía y ser transferida a un computador es el de poder visualizar en forma gráfica y precisa el momento en que se generó la máxima demanda registrada en la empresa o bien obtener el perfil del consumo de energía de una carga en diversas situaciones de operación.

El poder conectar el controlador de demanda a un computador le permite programarlo de manera más visual, precisa y simple que hacerlo directamente.

5 Fundamentos

5.1 Definiciones.

Potencia se puede definir como la razón con la que un elemento gasta o absorbe la energía y se mide en watts (W) [4].

$$p = dw/dt \quad (5-1)$$

Potencia instantánea $p(t)$, es la potencia en cualquier instante de tiempo.

Potencia promedio P , es el promedio de la potencia instantánea durante un período de tiempo (T).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) * dt \quad (5-2)$$

Las siguientes definiciones y gráficas que fueron tomadas de un documento [5] de la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía (CONAE) que ahora se llama Comisión Nacional para el uso eficiente de la Energía (CNUEE).

Carga instalada: Es la capacidad total en kW conectada a la instalación eléctrica.

Demanda: Es el valor en kW medido en un instante.

Demanda máxima: Es la demanda medida en kW durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica fue mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en periodo de consumo. En la Figura 5-1 se presenta un ejemplo de la variación de la demanda durante un día. Los 15 minutos se manejan como una ventana deslizante que se va recorriendo en tramos de 5 minutos. Es decir, cada 5 minutos se obtiene el promedio de la potencia de los 15 minutos anteriores.

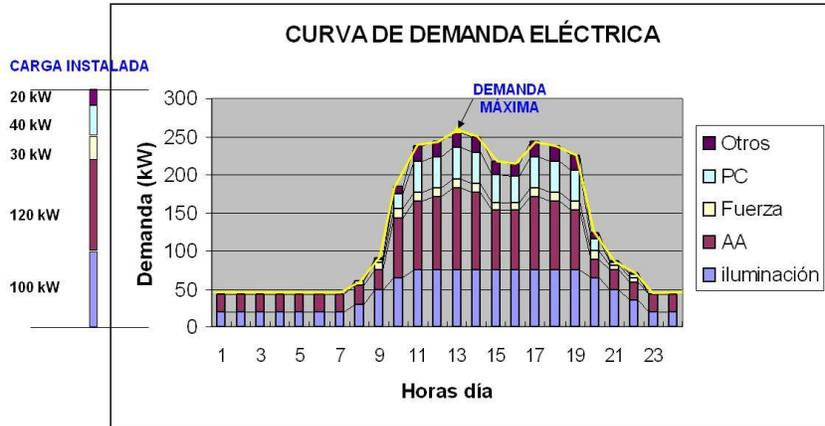


Figura 5-1. Curva de demanda eléctrica durante un día.

En el documento de la CFE [6], se compara la curva de demanda real con lo que debería ser la curva ideal. En la Figura 5-2 se aprecia la relación de las mismas. Ambas curvas comprenden la misma área bajo ellas (mismo consumo de energía), pero su diferencia es dada por el valor de la demanda máxima. En el consumo de energía se debe tratar de que la demanda máxima tenga el menor valor posible para que el cobro por este rubro sea también menor. Lo ideal sería una curva como la señalada por la línea punteada. Lograr esto en la vida real es imposible, solo se presenta como caso de comparación. La manera de lograr disminuir la demanda máxima es simplemente distribuyendo lo más posible la operación de las cargas a través de diferentes horarios.

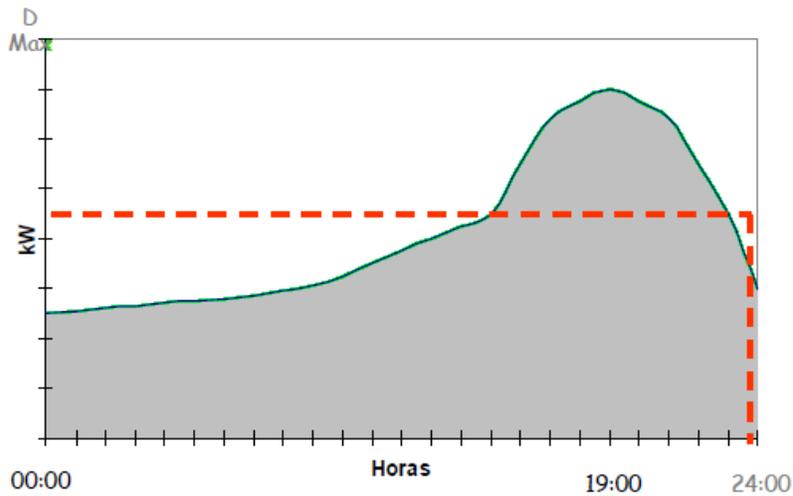


Figura 5-2 Curva de demanda y curva ideal de demanda.

Una manera de comparar las curvas de demanda es a través del factor de carga (FC). Una forma de obtener este factor de carga es dividiendo la demanda promedio entre la demanda máxima.

$$FC = \frac{\textit{Demanda_Promedio}}{\textit{Demanda_Maxima}} \quad (5-3)$$

Si multiplicamos arriba y debajo de la ecuación por el período de facturación (T) se obtiene otra forma más simple de obtener el FC.

$$FC = \frac{\textit{Demanda_Promedio}}{\textit{Demanda_Maxima}} * \frac{T}{T} = \frac{\textit{Consumo_eléctrico_en_el_período}}{\textit{Demanda}_{Máxima} * T} \quad (5-4)$$

En una gráfica ideal de consumo como la que se muestra en la Figura 5-2, el factor de carga da igual a uno. Por lo tanto, entre más cercano sea el factor de carga al valor de uno, indica que se tiene un mayor aprovechamiento de la capacidad instalada. Y viceversa, entre menor sea el factor de carga, mayor oportunidad de reducir la demanda máxima.

5.2 Esquema de facturación de CFE

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) maneja varios esquemas de cobro. El de interés para el controlador de demanda es básicamente la tarifa OM aunque también puede ser de ayuda en tarifas HM, ambas son de media tensión [7].

5.2.1 Tarifa O-M

De acuerdo a las políticas de CFE, la tarifa O-M se define como: "Tarifa ordinaria para servicio general en media tensión, con demanda menor a 100 kW".

El cobro de la energía en esta la tarifa O-M incluye varias componentes [8], todas ellas se ilustran el Figura 5-3.

CLASIFICACIÓN	COBRO POR DEMANDA	COBRO POR ENERGÍA kWh	CARGO M. B. T.	RECARGO O BONIFICACIÓN F. P.	I. V. A.	D. A. P. U OTROS
TARIFA OM	$\text{kW} \times \$/\text{kW}$	$\text{kWh} \times \$/\text{kWh}$	$2\% \times \text{FBA}$	$+ \% R \times \text{FN}$ $- \% B$	$15\% \text{ ó } 10\% \times \text{FNE}$	$\% \text{ AUTORI.} \times \text{FB}$
<p> \leftarrow FACTURACIÓN BÁSICA = FB M.B.T.: Medición en baja tensión. \leftarrow FACTURACIÓN NORMAL = FN F.P.: Factor de potencia. \leftarrow FACTURACIÓN NETA = FNE \leftarrow FACTURACIÓN NETA = FT </p> <p>MÍNIMO MENSUAL.- SI AL APLICAR LAS CUOTAS ESTABLECIDAS PARA ESTA TARIFA, LA FACTURACIÓN RESULTA MENOR AL MÍNIMO MENSUAL, SE APLICARÁ ESTE ÚLTIMO.</p> <p>EN CASO DE OCURRIR UN RECARGO O BONIFICACIÓN POR F.P. SE APLICARÁN LAS FÓRMULAS ESTABLECIDAS EN LA DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA No. 3 DE LAS TARIFAS EN VIGOR.</p> <p>NOTA: APLICACIÓN DEL 10% ó 15% DE I.V.A. ES DE ACUERDO A LO ESTABLECIDO EN LA LEY DEL IMPUESTO AL VALOR AGREGADO, PUBLICADA EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL DÍA 31 DE MARZO DE 1995.</p>						

Figura 5-3. Componentes que incluyen el cobro en la tarifa O-M de CFE.

El primer concepto es el cobro por demanda, al cual también se refiere como “carga por kilowatt de demanda máxima medida”. Este se calcula multiplicando la demanda máxima en kW por el costo de cada kW de demanda máxima.

La demanda máxima CFE la define como: “La demanda máxima medida se determinará mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo de facturación”.

En otras palabras, la demanda máxima medida, es el valor máximo que se obtiene de sacar la potencia promedio consumida durante 15 minutos continuos y con un deslizamiento en el tiempo de 5 minutos para cada medición como lo muestra la Figura 5-4.

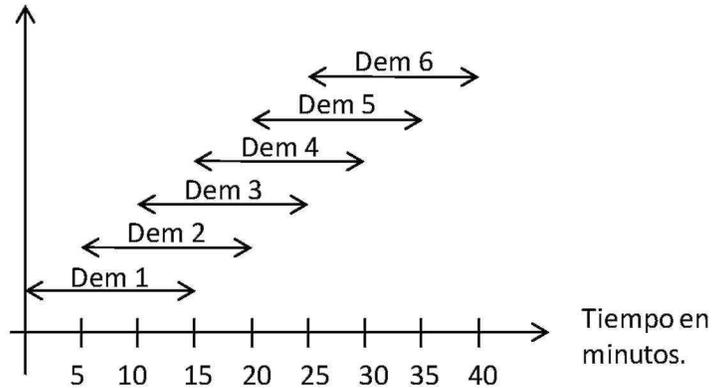


Figura 5-4. Medición de la demanda en intervalos de 15 minutos.

Cada 5 minutos se calcula el promedio de la potencia que se tuvo en los 15 minutos anteriores. Si el valor obtenido es mayor que el que se tiene como registrado hasta ese momento como máximo, pasará entonces a ser el nuevo valor para la demanda máxima. De otra forma, el valor se ignora.

Demanda máxima en el período de facturación = max (Dem 1, Dem 2, Dem 3,...)

Al finalizar el período (1 mes), el cobro por este concepto simplemente será la multiplicación de la demanda máxima por el precio por kW de demanda que como se aprecia en la Figura 5-5, es de \$146.74.

Tarifa O-M (2010 - 2011)

Consultar tarifas de: 2011 ▼

Tarifa ordinaria para servicio general en media tensión, con demanda menor a 100 kW

2.- Cuotas aplicables en el mes de NOVIEMBRE de 2011.

Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda máxima medida y por la energía consumida:

Región	CARGO por kilowatt de demanda máxima medida	CARGO por kilowatt - hora de energía consumida
Central	\$ 159.59	\$ 1.370
Noreste	\$ 146.74	\$ 1.280
Noroeste	\$ 149.81	\$ 1.271

Figura 5-5. Costos del kW de demanda y del kWh de energía consumida.

Este valor es el costo que se quiere disminuir lo más posible con el controlador de demanda y se puede lograr simplemente con la reprogramación de la operación de las cargas y sin llegar a afectar la producción.

Para visualizar el efecto de este costo por demanda máxima en el precio unitario por kWh consumido se introducirá el factor FC. El costo unitario por kWh está formado básicamente por el costo de la energía y el costo por demanda facturada.

$$\frac{\$}{kWh} = \frac{\$}{kWh} \Big|_{Energia} + \frac{Dmax(kW)}{Consumo(kWh)} \frac{\$}{kW} \Big|_{Dem} * \frac{T(h)}{T(h)} \quad (5-5)$$

Si la ecuación se multiplica y divide por el período de consumo no se altera. Lo anterior se hace con el objetivo de que nos quede la definición del factor FC y nos permita calcular su impacto en el costo unitario del kWh.

$$\frac{\$}{kWh} = \frac{\$}{kWh} \Big|_{Energia} + \frac{1}{FC} \frac{\$}{kW} \Big|_{Dem} * \frac{1}{T(h)} \quad (5-6)$$

El costo por demanda puede llegar a valer de un 25% al 35% del costo unitario total. Como ejemplo, se calculará el valor de FC para que el costo por demanda sea el 25% del costo total unitario en base a los datos de la Figura 5-5. Como período se consideró un mes.

$$\frac{\$}{kWh} = 1.28 \Big|_{Energia} + \frac{1}{FC} 146.74 \Big|_{Dem} * \frac{1}{(30) * (24)} \quad (5-7)$$

$$\frac{\$}{kWh} = 1.28 + \frac{0.204}{FC} \quad (5-8)$$

Se realizan las operaciones para que el costo por demanda sea el 25% del costo unitario.

$$\left(\frac{1.28}{.75}\right) * 0.25 = \frac{0.204}{FC} \quad (5-9)$$

$$FC = 0.478 \quad (5-10)$$

Lo anterior nos señala que para este caso, un FC de casi el 0.5 impacta con el 25% del costo unitario. Si tomamos como ejemplo una empresa que solo trabaja un turno de 8 horas al día, pues su FC estará alrededor del 0.33 con lo cual hace que el impacto del FC sea aun mayor.

Otro cargo que se incluyen en la tarifa de CFE depende de si la medición de la energía se realiza en media o baja tensión. Se agrega también el cobro por factor de potencia, que puede generar un cargo o una compensación, el cobro del IVA y otros cobros varios.

5.2.2 Tarifa H-M

De acuerdo a las políticas de CFE, la tarifa H-M se define como: “Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más”.

El cobro de la energía en esta la tarifa H-M incluye varias componentes como se visualiza en la Figura 5-6.

CLASIFICACIÓN	COBRO POR DEMANDA FACTURABLE	COBRO POR ENERGÍA			CARGO M.B.T.	RECARGO O BONIFICACIÓN F. P.	I. V. A.	D. A. P. U OTROS
		kWh PUNTA	kWh INTERMEDIA	kWh BASE				
TARIFA HM	kw x \$/kW	+ kWhp x \$/kWhp	+ kWhi x \$/kWi	+ kWhb x \$/kWhb	+ 2% x FB	+ % R x FN + - % B	+ 15% ó 10% x FNE	+ % AUTORI. x FB
<p><-----> FACTURACIÓN BÁSICA = FB</p> <p><-----> FACTURACIÓN NORMAL = FN</p> <p><-----> FACTURACIÓN NETA = FNE</p> <p><-----> FACTURACIÓN TOTAL = FT</p> <p>MÍNIMO MENSUAL.- SI AL APLICAR LAS CUOTAS ESTABLECIDAS PARA ESTA TARIFA SEGÚN LA REGIÓN QUE CORRESPONDA, LA FACTURACIÓN RESULTA MENOR AL MÍNIMO MENSUAL, SE APLICARÁ ESTE ÚLTIMO.</p> <p>EN CASO DE OCURRIR UN RECARGO O BONIFICACIÓN POR F.P. SE APLICARÁN LAS FÓRMULAS ESTABLECIDAS EN LA DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA No. 3 DE LAS TARIFAS EN VIGOR.</p> <p>NOTA: APLICACIÓN DEL 10% ó 15% DE I.V.A. ES DE ACUERDO A LO ESTABLECIDO EN LA LEY DEL IMPUESTO AL VALOR AGREGADO, PUBLICADA EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL DÍA 31 DE MARZO DE 1995.</p>								

Figura 5-6. Componentes que incluyen el cobro en la tarifa H-M de CFE.

La principal diferencia de esta tarifa con respecto a la tarifa O-M, es el manejo de tres tipos de horario de consumo durante el día que son: base, intermedio y punta. Aquí, el consumo en cada uno de estos horarios se maneja en forma independiente, es decir, para cada uno de ellos se obtiene su demanda máxima medida en kW y el consumo de energía en kWh.

El cobro por energía es simplemente lo consumido en cada horario por el costo por kWh en cada uno de ellos.

En esta tarifa H-M, lo que nos interesa es el costo por demanda máxima que aquí CFE se refiere como “Cobro por demanda facturable”. Para este cobro, lo primero que se debe obtener durante el período de facturación, son las demandas máximas medidas obtenidas en cada uno de los tres horarios. A estas demandas se les llama: a) Demanda máxima medida en el período de base (DB). b) Demanda máxima medida en el período intermedio (DI) y c) Demanda máxima medida en el período de punta (DP).

Una vez obtenidas la demanda en cada uno de los horarios, se calcula la demanda facturable (DF) con la siguiente ecuación:

$$DF = DP + FRI \times \max(DI - DP, 0) + FRB \times \max(DB - DI, 0) \quad (5-11)$$

En la ecuación anterior, las variables FRI y FRB son factores de reducción para las demandas máximas medidas en el horario intermedio y en el horario base con el propósito de provocar en el usuario de que las demandas máximas sean mayores en estos dos horarios y menor en el horario de punta. En la Figura 5-7 se presentan los valores de estos factores para la región noreste.

7.- Demanda facturable

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria:

Región	FRI	FRB
Noreste	0.300	0.150

Figura 5-7. Factores de reducción de los horarios intermedio y base.

Otra forma de ver el cálculo de la demanda facturable es:

$$DF = DP$$

$$+ \text{ Si } DI > DP \quad \rightarrow \text{ agregar } (DI - DP) * FRI$$

$$+ \text{ Si } DB > \max(DP, DI) \quad \rightarrow \text{ agregar } (DB - \max(DP, DI)) * FRB$$

Es decir, la demanda máxima de punta se cobra al 100%. Si la demanda máxima intermedia rebasa a la de punta, se cobra esta diferencia multiplicada por el factor de reducción de FRI. Y si la demanda máxima de base rebasa a las dos demandas máximas anteriores se cobra la diferencia con que las rebasa multiplicada por el factor de reducción de FRB. Se observa que el factor de reducción FRB es la mitad del factor de reducción FRI. Lo anterior trata de impulsar que la demanda máxima en el período de base sea la más alta, luego se trata que le siga la demanda máxima en el intermedio, y finalmente que la demanda máxima en el período de punta se trate de que sea la más baja.

Una vez que se calcula la demanda facturable en kW habrá que multiplicarla por el “cargo por kilowatt de demanda facturable” para obtener el “cobro por demanda facturable”. En la Figura 5-8 se muestra que este cargo es de \$147.59 por cada kW facturable.

Región	Cargo por kilowatt de demanda facturable	Cargo por kilowatt - hora de energía de punta	Cargo por kilowatt - hora de energía intermedia	Cargo por kilowatt - hora de energía de base
Noreste	\$ 147.59	\$ 1.6450	\$ 0.9455	\$ 0.7746

Figura 5-8. Factores de cargo por demanda facturable y por energía consumida.

En la Figura 5-8, se observa con respecto a las tarifas de consumo de energía, que es mucho más caro el kWh consumido en horario de punta que el kWh

consumido en horario intermedio, y este a su vez es más caro que el kWh consumido en horario base. Todo esto con el fin de provocar que el consumo de energía se trate de hacer lo más posible en el horario base y después en el horario intermedio y finalmente en el horario de punta.

5.3 Teoría Series en el tiempo

El controlador de demanda requiere de pronosticar el consumo futuro de demanda en un tiempo dado para poder tomar acción sobre las cargas actuales ya sea desactivándolas cuando se observe que hay probabilidad de rebasar la demanda máxima establecida o bien activándolas cuando se vea que hay capacidad de carga disponible.

Para realizar los pronósticos es necesario analizar el comportamiento de los cambios en la señal de potencia en el transcurso del tiempo. Esto nos genera una serie de muestras que son las nos permitirán predecir el consumo de esa potencia en un tiempo cercano. Se está hablando de un tiempo menor a los cinco minutos.

Al obtener muestras que indican la variación de la potencia en el tiempo, nos generan puntos de información que se les conoce como series en el tiempo y para su análisis se consultaron varios libros [9], [10].

También se consultaron artículos de revistas científicas para conocer los métodos que se utilizaban y las recomendaciones que hacían. En la referencia [11] se describen métodos básicos y simples de los cuales se seleccionó el de suavización exponencial ya que no se querían realizar operaciones complejas ni laboriosas en el microcontrolador. En artículos más recientes [12], [13], se describen métodos más sofisticados y eficientes. Hay otros artículos en que se utilizaban métodos más complejos [14] y que incluían tipos de cargas específicas o se estudiaba un caso en particular como ejemplo el de control de cargas en la minería [15]. Se trató de aplicar un método simple pero que fuera efectivo. También se encontró mucha aplicación de métodos de pronóstico de demanda pero para compañías generadoras de electricidad [16] para que les permitiera planear su operación de generación de energía.

Para el estudio de las series en el tiempo existen varios parámetros que sirven para entender o diferenciar su comportamiento tales como: A) Tendencia. Este parámetro nos indica en un largo tiempo si la serie es creciente o decreciente. B) Estacionalidad. Nos indica si la serie conserva un cierto patrón de cambio en el tiempo. Por ejemplo, que en la noche los valores son pequeños y en el día son grandes. C) Ciclisidad. Nos indica si el cambio en los valores lleva cierta repetición o periodicidad alrededor de la tendencia de los valores de la serie. D)

Aleatoriedad. Nos indica lo aleatorio quitando los parámetros anteriores como es la variabilidad de esas muestras.

Para realizar el pronóstico a través de las series de muestras recolectadas existen varios métodos como por ejemplo: Método del promedio móvil simple o doble, Método de Suavización exponencial simple, Método de suavización exponencial doble por el método de Brown, Método de suavización exponencial ajustada por el método de Holt, etc..

Al aplicar cualquiera de los métodos existen formas de medir la precisión del pronóstico que se realiza con ellos. Algunas de estas medidas que comparan el valor pronosticado por el método aplicado con el valor real se enumeran a continuación. En las siguientes ecuaciones la “x” es el valor real, “p” es el valor pronosticado y “t” es el tiempo.

Error absoluto:
$$E_t = |x_t - p_t|$$

Error promedio absoluto:
$$EPA = \frac{\sum_{i=1}^n |x_t - p_t|}{n}$$

Suma de errores al cuadrado.
$$SEC = \sum_{i=1}^n (x_t - p_t)^2$$

Error cuadrático medio.
$$SEC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_t - p_t)^2}{n}$$

Desviación estándar del error:
$$DEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_t - p_t)^2}{n-1}}$$

5.3.1 Método de pronóstico suavización exponencial simple

Es de los métodos más simples para realizar el pronóstico del siguiente valor en una serie en el tiempo y de los más utilizados en la vida real. Aquí, el valor pronosticado depende de todos los valores obtenidos anteriormente. Es decir, lo que hace este método es dar una ponderación a cada uno de los datos reales de la serie que ya se han obtenido para en base a ello predecir el valor que se tendrá en la siguiente muestra. Este peso que se les asigna es un valor de credibilidad para cada una de esas muestras. A los datos más recientes se les da mayor credibilidad que significa que se les asigna un mayor peso, y conforme el dato se va alejando con respecto al tiempo actual su credibilidad en él es menor y por lo cual se le va asignando un peso también menor. El peso o credibilidad que se asigna al valor más reciente es de “α”. A la siguiente muestra que sigue en el tiempo se le asigna un peso de “(1-α)”. A la muestra que sigue, que es más antigua, se le asigna “(1-α)²” y así sucesivamente hasta finalizar. Para que esto funcione correctamente es necesario que el valor de “α” sea menor a uno. La serie quedaría como se muestra a continuación.

Definición de las variables:

x_t : Es el valor correcto en tiempo "t".

p_{t+1} : Es el valor que se pronostica para x_{t+1} .

La serie para el cálculo de p_{t+1} con los pesos ya asignados a cada uno de los valores reales ya conocidos quedaría de la forma siguiente:

$$p_{t+1} = \alpha x_t + \alpha (1-\alpha)^1 x_{t-1} + \alpha (1-\alpha)^2 x_{t-2} + \alpha (1-\alpha)^3 x_{t-3} + \dots + 0 \quad (5-12)$$

La serie termina en cero ya que $(1-\alpha)^\infty = 0$, siempre que α sea un valor positivo menor a uno.

La serie correspondiente para p_t sería:

$$p_t = \alpha x_{t-1} + \alpha (1-\alpha)^1 x_{t-2} + \alpha (1-\alpha)^2 x_{t-3} + \alpha (1-\alpha)^3 x_{t-4} + \dots + 0 \quad (5-13)$$

Sacando como factor a $(1-\alpha)$ en la ecuación (1) queda:

$$p_{t+1} = \alpha x_t + (1-\alpha)(\alpha x_{t-1} + \alpha (1-\alpha)^1 x_{t-2} + \alpha (1-\alpha)^2 x_{t-3} + \dots + 0) \quad (5-14)$$

Sustituyendo en la ecuación (3) la ecuación (2) se obtiene que:

$$p_{t+1} = \alpha x_t + (1-\alpha)p_t \quad (5-15)$$

La ecuación anterior indica que el valor pronosticado para tiempo "t+1" solo depende del valor correcto en tiempo "t" que es " x_t " y del valor pronosticado que se generó en tiempo "t" el cual fue " p_t ". En pocas palabras, el valor pronosticado depende de la última muestra y del pronóstico que se le dio.

Ya con la teoría anterior se procedió a entender su comportamiento ante diferentes tipos de series de datos que en este proyecto se trataría de potencias instantáneas las que conformarían estas series de tiempo.

5.3.2 Análisis del efecto de suavización exponencial sobre series de potencia instantánea

En esta sección se presenta el efecto de la suavización exponencial con diferentes valores de alfa sobre los valores de potencia instantánea generados de diversas formas.

5.3.2.1 Potencias instantáneas generadas en forma totalmente aleatoria

Se comenzó con analizar el pronóstico en potencias generadas de forma aleatoria y se utilizaron diferentes valores de alfa para comparar su efecto sobre una misma serie de tiempo.

La ecuación del método de suavización exponencial aplicada para el pronóstico de potencia es la presentada en la ecuación a continuación.

$$Ppro_{t+1} = \alpha Pi_t + (1-\alpha)Ppro_t \quad (5-16)$$

Donde Pi_t es la potencia real en tiempo "t", $Ppro_t$ es la potencia pronosticada en tiempo "t" y $Ppro_{t+1}$ es la potencia que se pronostica habrá en tiempo "t+1".

La Figura 5-9, presenta la curva de la potencia instantáneas generadas aleatoriamente (Pi) y la curva de la potencia pronosticada ($Ppro$) para un valor de $\alpha=0.1$. Se observa que la curva que se genera con los valores pronosticados es mucho más suave en sus cambios que la curva generada por los valores instantáneos de potencia. Por eso es que el método es llamado suavización.

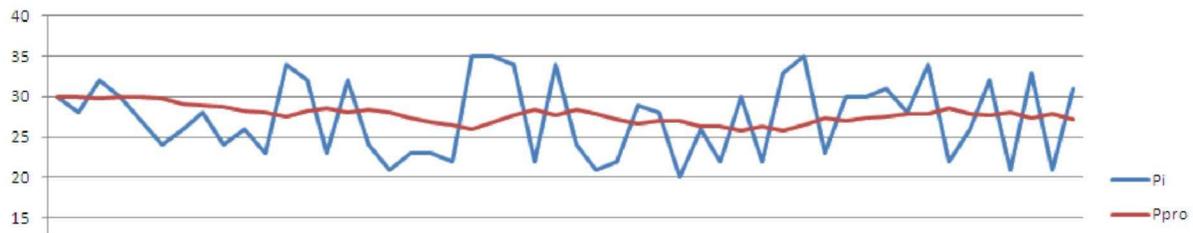


Figura 5-9. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$.

En la Figura 5-10 y en la Figura 5-11, se presentan las gráficas generadas con valores de $\alpha=0.5$ y $\alpha=0.9$. Esto se realizó para visualizar el efecto de la variación de estos valores de alfa sobre la curva de valores pronosticados.

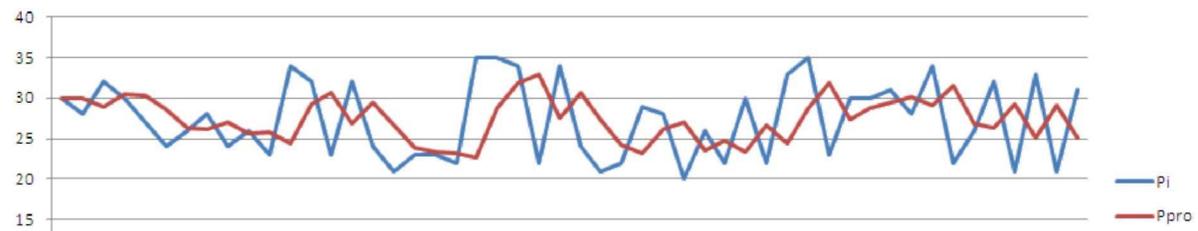


Figura 5-10. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$.

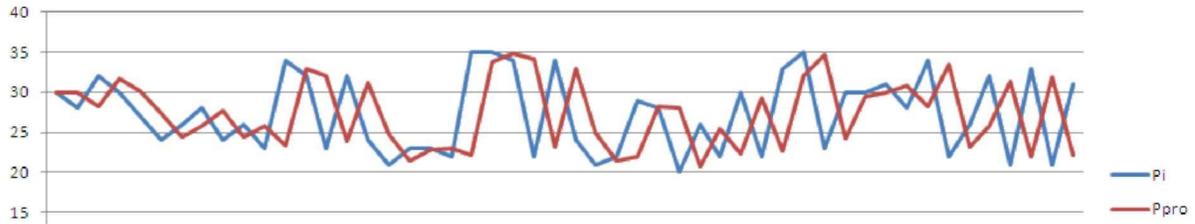


Figura 5-11. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$.

Comparando las tres graficas se observa que entre más pequeño es el valor de alfa (menor credibilidad al valor de potencia instantánea real) la curva generada es mucho más suave. Conforme el valor de alfa crece (mayor credibilidad a la potencia real) la curva de los valores pronosticados tiende a aparecerse a la curva de los valores reales pero con un cierto grado de desfase.

Para realizar la comparación con respecto a la calidad de predicción de la potencia real instantánea para diferentes valores de alfa se utilizó el parámetro de la suma de los errores al cuadrado entre la potencia instantánea y la potencia pronosticada como lo muestra la siguiente ecuación.

$$SEC = \sum_{i=1}^n (Pi_t - Ppro_t)^2 \quad (5-17)$$

Esta ecuación se aplicó a las potencias con el valor de alfa igual a 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9. Los valores resultantes se representan en forma gráfica en la Figura 5-12. En esta figura se observa que el valor de alfa=0.1 es la que mejor predice, ya que es la que genera la menor suma de los errores al cuadrado de la potencia pronosticada con respecto a la potencia instantánea. Vemos que conforme se incrementa el valor de alfa, esta suma de errores al cuadrado también se va incrementando. Con esto concluimos que cuando la serie es totalmente aleatoria entre más pequeño sea el valor de alfa menor es el error en la predicción y también más suavizada estará la curva.

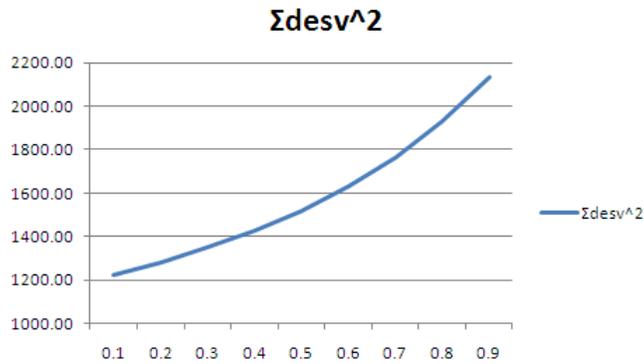


Figura 5-12. Gráfica de la suma de los errores al cuadrado con respecto a α .

Antes de hacer uso de este método de suavización exponencial, hay necesidad de realizar primero pruebas o simulaciones sobre datos reales para obtener el valor de α que mejor predice los valores reales de nuestro caso en particular.

5.3.2.2 Efecto de α en la potencia pronosticada y en la demanda pronosticada

Para realizar el estudio del pronóstico de la potencia real, se consiguieron bases de datos reales que proporcionaban la variación de esta potencia medida en kW cada 15 segundos durante las 24 horas del día. Se estudió el comportamiento de la predicción del método de suavización exponencial para diferentes valores de α .

En las gráficas de la Figura 5-13, Figura 5-14 y Figura 5-15, se presentan los resultados de variar α con valores de 0.1, 0.5 y 0.9 para las muestras obtenidas del consumo de potencia de un mismo día. Se grafica tanto la potencia real (P_{i15s}) como la potencia pronosticada (P_{pro15s}) cada 15 segundos. Se resalta el valor de la potencia pronosticada cada minuto (P_{pro1m}) ya que es uno de los valores que utiliza el controlador de demanda para realizar el control del encendido y apagado de las cargas en función de la demanda.

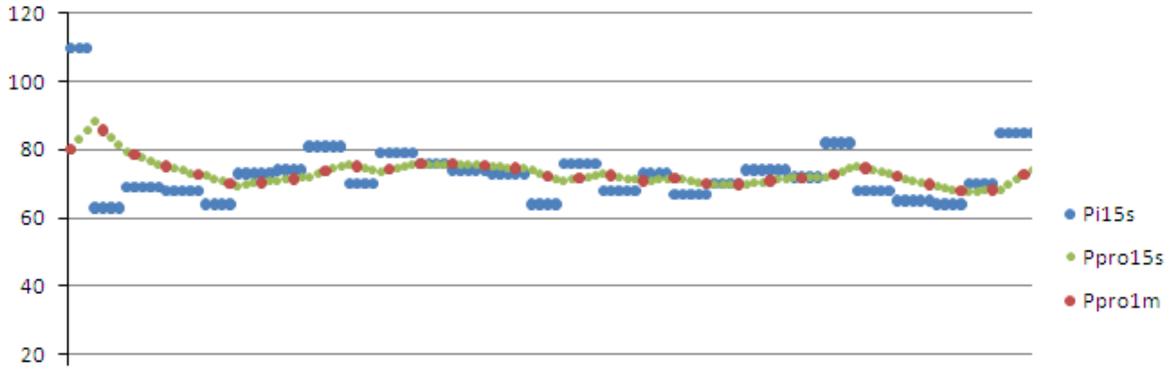


Figura 5-13. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$.

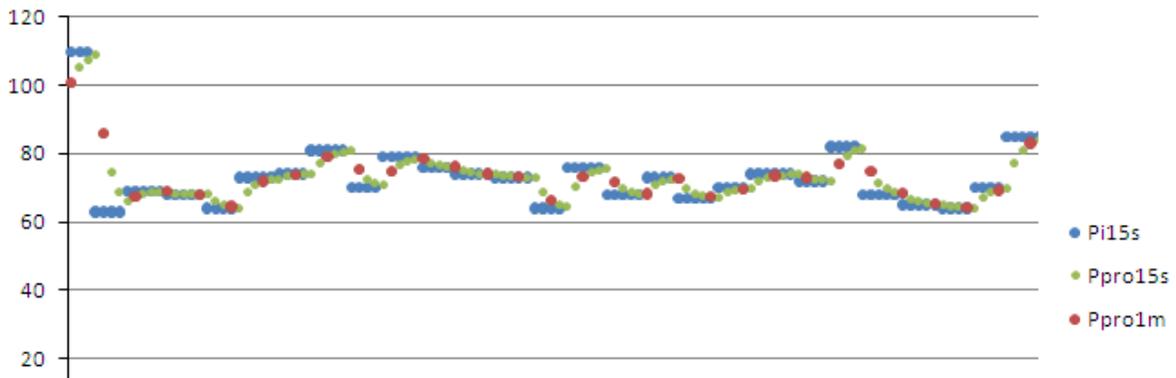


Figura 5-14. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$.

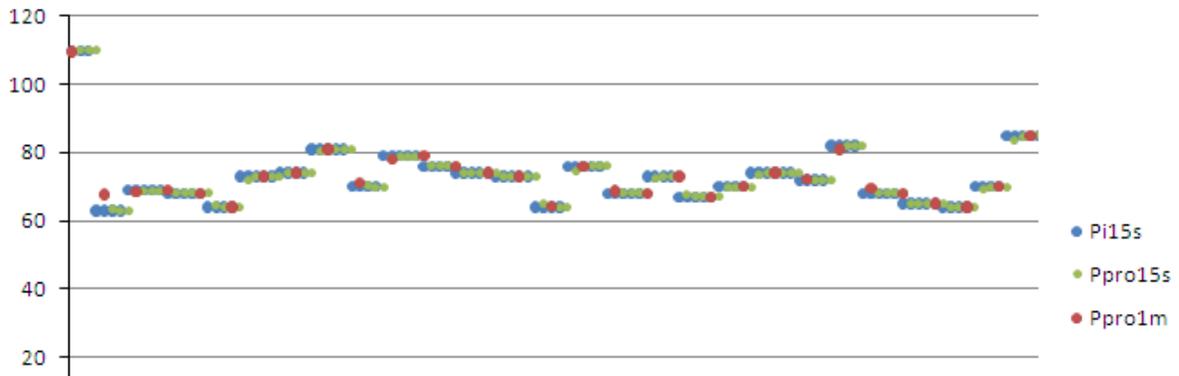


Figura 5-15. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$.

Debido que tanto el medidor de potencia como el controlador de demanda realizan las mediciones en valores enteros de kW, se observa en la gráfica que se generan muchos valores repetidos en forma seguida de la potencia real (Pi15s).

También se observa en estas figuras, que la gráfica de la potencia pronosticada para $\alpha=0.1$ es mucho más suave que la gráfica para $\alpha=0.5$ y esta a su vez es también más suave que la de $\alpha=0.9$. Pero en cuestión de pronosticar parece que la de $\alpha=0.9$ pronostica mejor los valores de la potencia real.

Para obtener el valor de α que mejor predice los valores reales de potencia, se obtuvo la raíz cuadrada de la suma de las diferencias entre el valor real y el pronosticado elevado al cuadrado, lo cual se representa en forma de ecuación a continuación.

$$SEC = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Pi15s_t - Ppro15s_t)^2} \quad (5-18)$$

La gráfica de la Figura 5-16, representa las variaciones encontradas para valores de α de 0.1 al 0.9. En la gráfica se observa que a mayor valor de α , menor magnitud de la variación, lo cual indica una mejor predicción. Lo anterior es provocado por la repetición de los valores debido al redondeo a kW de las muestras obtenidas.

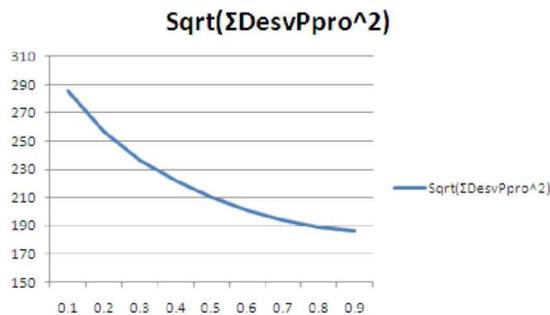


Figura 5-16. Gráfica de las variaciones obtenidas con respecto a α .

En los primeros casos analizados, se dijo que a menores valores de α , mejor predicción. Pero esto era válido si estos valores de potencia eran generados en forma totalmente aleatoria, cosa que con la repetición de los valores y por varias veces seguidas elimina totalmente la aleatoriedad de los mismos.

Solo para comprobar que lo comentado anteriormente es válido, se procedió a tomar los mismos valores de la gráfica anterior pero eliminando los valores seguidos que están repetidos. Con estas nuevas series de valores de potencia se generaron las gráficas Figura 5-17, Figura 5-18 y Figura 5-19 con valores de α iguales a 0.1, 0.5 y 0.9.

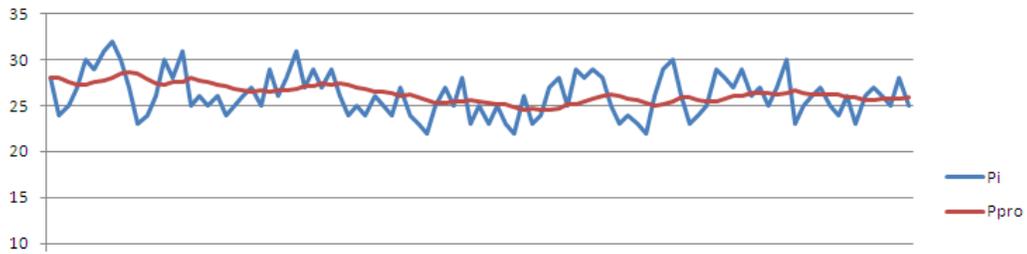


Figura 5-17. Pronósticos con valor de $\alpha=0.1$.

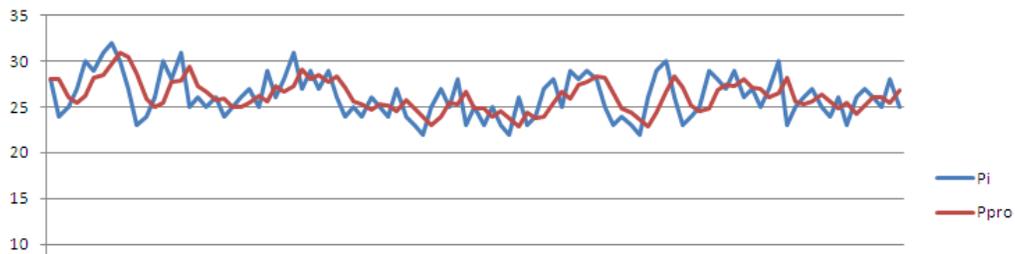


Figura 5-18. Pronósticos con valor de $\alpha=0.5$.

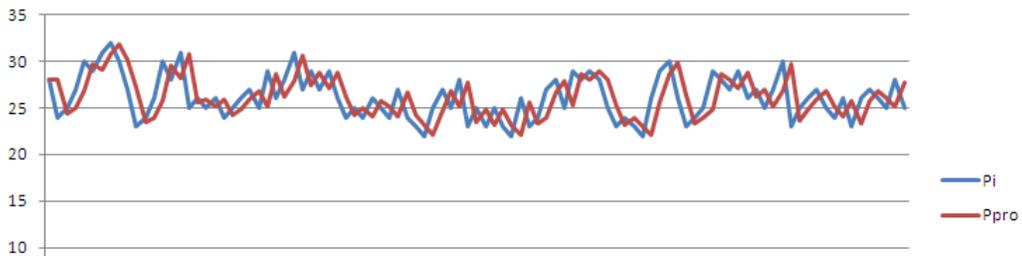


Figura 5-19. Pronósticos con valor de $\alpha=0.9$.

La gráfica de la Figura 5-20, representa la suma de los errores al cuadrado de la potencia instantánea con respecto a su potencia pronosticada de los datos anteriores. Se evaluó para valores de alfa que van de 0.1 a 0.9. En la figura se observa que el mejor pronóstico se logra, para este caso en particular, con valor de alfa=0.2, ya que con este valor se tiene que la suma de las desviaciones al cuadrado es mínima.

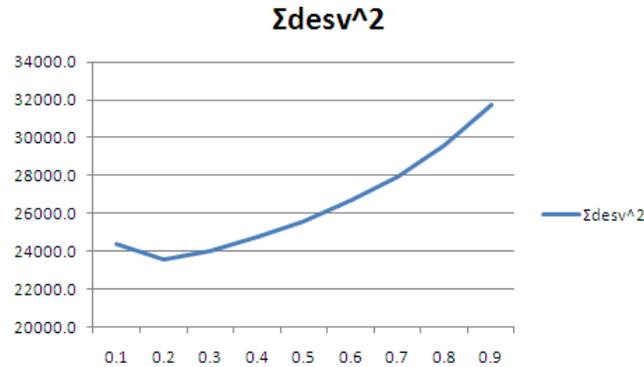


Figura 5-20. Gráfica de la suma de los errores al cuadrado con respecto a α .

En el caso del controlador de demanda se recomienda utilizar un valor pequeño de alfa (≤ 0.3) para que la potencia pronosticada no tenga variaciones grandes y haga que una carga que se acaba de encender se tenga que apagar nuevamente.

5.4 Pronóstico de la demanda en un intervalo de 15 minutos

Una vez que se decidió utilizar el método de pronóstico de suavización exponencial para pronosticar la potencia, se tratará ahora el problema de pronosticar la demanda, lo cual es realmente uno de los objetivos del controlador de demanda ya que se desea que no se rebase un valor de demanda máximo especificado.

El controlador de demanda, conforme avanza el tiempo, va almacenando el área bajo la curva generada por las potencias medidas, lo cual equivale a calcular la energía consumida. Cada vez que se cumplen los 5 minutos, se almacena el valor del área comprendida en ellos (energía consumida en esos 5 minutos). Solo se mantienen almacenadas las últimas dos áreas (A_1 y A_2) y el valor del área acumulada hasta el tiempo actual (A_3). El área correspondiente al tiempo faltante para completar los 5 minutos (A_4), es un área que se tendrá que pronosticar. En la Figura 5-21 se presentan gráficamente estas áreas.

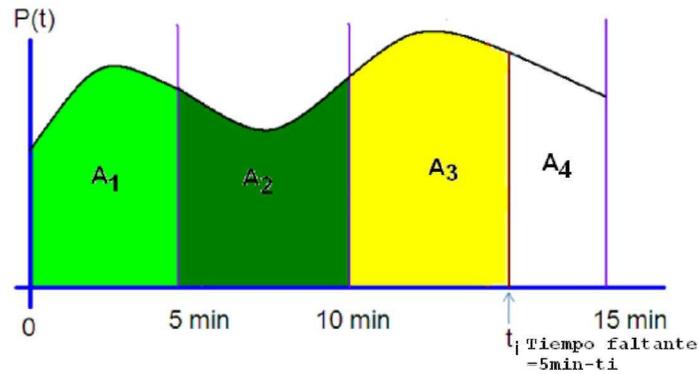


Figura 5-21. Áreas involucradas para calcular la demanda.

EL cálculo del área faltante (A_4) se obtiene multiplicando el tiempo faltante por la potencia pronosticada en ese instante como la muestra la siguiente ecuación.

$$A_4 = (5 - t_i) * Ppro_{t+1} \quad (5-19)$$

Una vez que se tienen el valor de las cuatro áreas, se calcula la demanda para ese instante t_i que es el pronóstico de la que se tendrá al término de los 5 minutos actuales. Simplemente se suman las cuatro áreas y se divide entre el tiempo que ocupa la base que es de 15 minutos o bien su equivalente a 900 segundos, lo cual nos dará la potencia promedio en ese intervalo que equivale a la demanda con que se pronostica.

$$Dpro_t = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)}{15min.} \quad (5-20)$$

Se observa que cada vez que se completan los 5 minutos, el área A_4 vale cero y por lo tanto la demanda pronosticada en este tiempo es realmente la demanda real.

Para demostrar el funcionamiento de esta forma de pronosticar la demanda se procedió a realizar los cálculos en las base de datos que se tenían sobre el consumo de potencia durante el día.

La Figura 5-22, representa la gráfica del consumo de potencia instantánea del durante un día el cual se presenta como ejemplo de análisis. La potencia fue medida cada 15 segundos para que sea la misma base de tiempo que maneja el controlador de demanda.

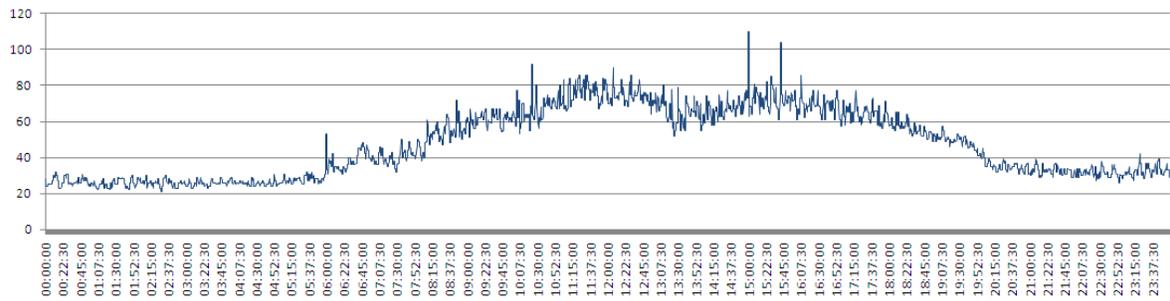


Figura 5-22. Gráfica del consumo de potencia durante un día laboral.

Se presentan a continuación las gráficas de análisis con duración de solo una hora para poder apreciar el comportamiento en forma gráfica del controlador de demanda. La hora seleccionada corresponde a la misma de los casos presentados en el pronóstico de la potencia pero ahora comparadas con las gráficas del cálculo de la demanda.

Solo se presentan las gráficas correspondientes a $\alpha=0.1$, 0.5 y 0.9 que corresponden a la Figura 5-23, Figura 5-24 y Figura 5-25. Los cálculos de demanda se realizan cada 15 segundos, pero la demanda que es importante es la que se obtiene cada minuto, ya que es con la que el controlador de demanda realiza la operación de encendido o apagado de las cargas.

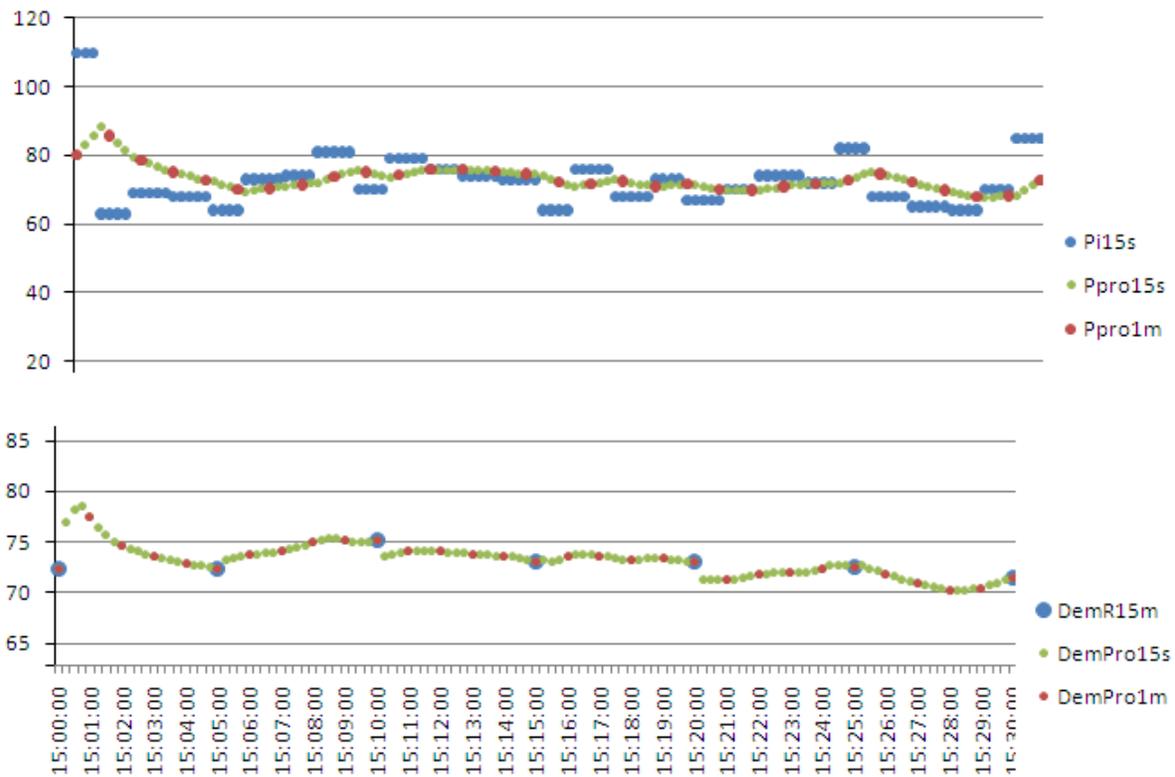


Figura 5-23. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con alfa=0.1

Al comparar las dos gráficas de la Figura 5-23, donde la primera gráfica incluye la potencia instantánea y la potencia pronosticada y la segunda incluye la demanda real y la demanda pronosticada. Se observa que la variación en los valores de la demanda pronosticada disminuye fuertemente, lo cual es lógico ya que vienen de un acumulado de 15 minutos con ventana deslizante de 5 minutos. Los puntos grandes en la gráfica de la demanda, indican el valor de la demanda evaluada cada 5 minutos, los cuales equivalen a la demanda real ya que en ese instante el área pronosticada es cero. Los puntos de diferente tono, indican el valor de la demanda cada minuto y los más puntos pegaditos, indican la demanda cada 15 segundos.



Figura 5-24. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con alfa=0.5

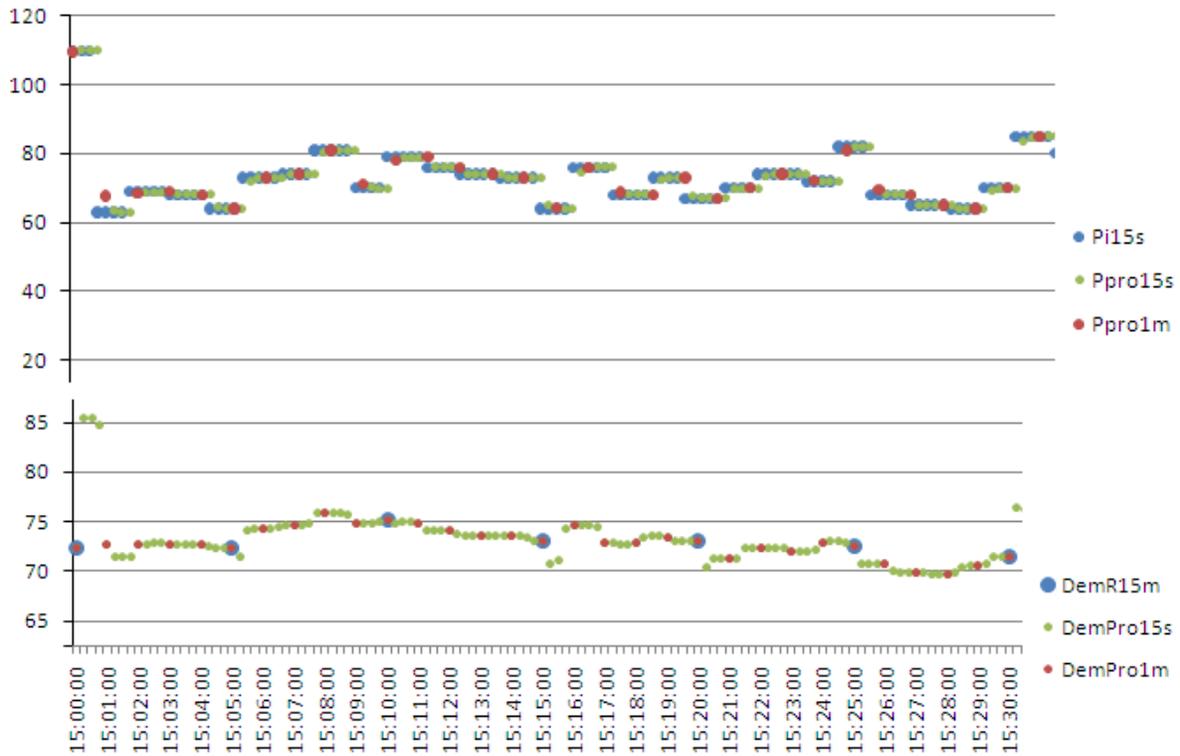


Figura 5-25. Gráficas de las potencias y demandas pronosticadas con alfa=0.9

Lo importante de observar en la gráfica anteriores de la demanda, es analizar cómo las estas demandas obtenidas cada minuto (puntos medianos) pronostican las demandas reales obtenida cada 5 minutos (los puntos grandes).

Se observa en las tres gráficas presentadas, que conforme el valor de alfa incrementa, los cambios en las demandas pronosticadas son más grandes. Lo que realmente importa es que también se pronostica la demanda real que se tendrá al completar los 5 minutos de la tercera ventana. Se procedió a analizar la variación entre los valores de las demandas pronosticadas y calculadas cada minuto con respecto al valor de la demanda real que pronostican se tendrá al completar los 5 minutos.

Se analizaron las variaciones para valores de alfa de 0.1 a 0.9. En la Tabla 5-1, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos valores sobre las gráficas presentadas anteriormente. El valor de "SumDesv²", es la suma de las desviaciones elevadas al cuadrado de la demanda pronosticada cada minuto con respecto a la demanda real que se tiene al final de los 5 minutos. Recordar que la demanda real se obtiene en función de la energía consumida en los 15 minutos anteriores. El valor de "MaxDesv", es la máxima desviación que se obtuvo de entre todas las desviaciones calculadas de la demanda pronosticada con respecto a la demanda real. El valor de "Sqrt(DesvPpro²)" es la desviación estándar entre los valores obtenidos de potencia instantánea (Pi) cada 15 segundos con respecto a la potencia que se pronosticó (Ppro) para ese valor.

Tabla 5-1. Desviaciones de la demanda pronosticada con respecto a la demanda real y desviación de la potencia pronosticada con respecto a la real.

Alfa	SumDesv^2	MaxDesv	Sqrt(Σ DesvPpro^2)
0.1	494.753	5.058	285.4874
0.2	551.387	6.503	256.8913
0.3	576.446	6.644	236.8065
0.4	588.479	6.080	221.7936
0.5	593.971	5.130	210.0961
0.6	597.370	3.990	200.9683
0.7	601.658	3.664	194.0905
0.8	608.622	4.050	189.2971
0.9	619.351	4.650	186.4753

En la Figura 5-26, se presenta en forma gráfica los valores de la desviación estándar obtenidos para cada uno de los valores de alfa entre la potencia pronosticada y la potencia instantánea real ($Sqrt(\Sigma DesvPpro^2)$). En la figura se observa que conforme aumenta el valor de alfa, la desviación va disminuyendo. Esto nos indica que entre más alto sea el valor de alfa el pronóstico es mejor. Esto es debido, como ya se explicó anteriormente, a la repetición de los valores muestrados de la potencia instantánea debido a su redondeo a kW.

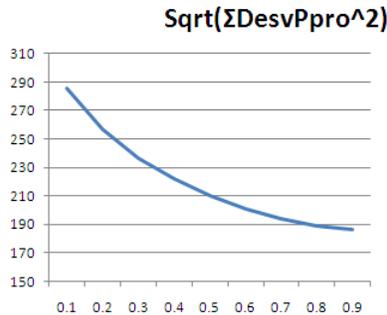


Figura 5-26. Gráficas de la variación estándar entre la potencia real y la pronosticada.

La suma de las desviaciones de la demanda pronosticada con respecto a la real ($SumDesv^2$) para cada valor de alfa se representa en forma gráfica en la Figura 5-27 (a). Aquí se observa que conforme el valor de alfa se incrementa también la suma de las desviaciones va incrementando. Esto nos indica que con respecto al parámetro $SumDesv^2$, conviene que el valor de alfa sea el menor posible. La Figura 5-27 (b), representa la gráfica de la máxima desviación entre las demandas pronosticadas y la demanda real al final de los 5 minutos ($MaxDesv$) que se obtuvo para cada uno de los valores de alfa. La gráfica señala que esta máxima desviación tiene incrementos y decrementos conforme se varía alfa. Con respecto a este parámetro $MaxDesv$, se observa que el valor de alfa que nos conviene

utilizar, para este caso específico, es el que genera el menor valor de máxima desviación el cual se logra con el valor de $\alpha=0.7$.

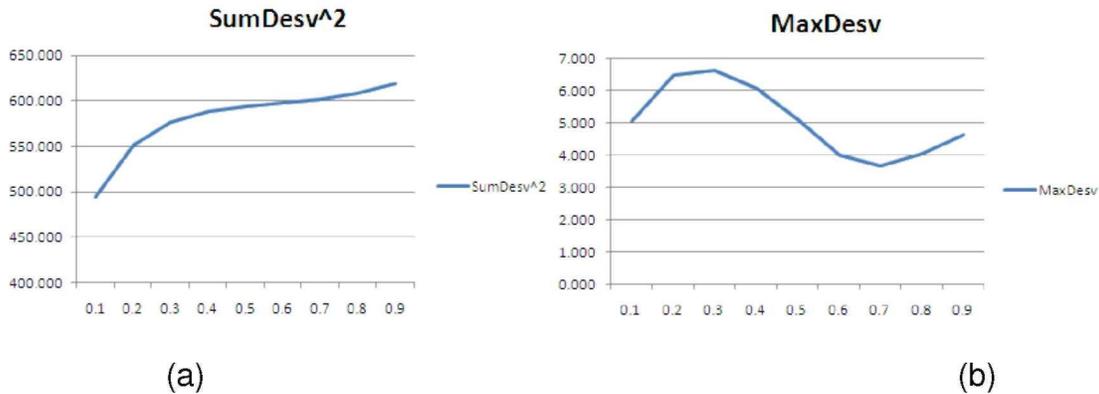


Figura 5-27. Gráficas de las variaciones entre demandas pronosticadas y la real.

Se tiene que entre más pequeño sea el valor de α , menor será la suma de las desviaciones de las demandas pronosticadas con respecto a la demanda real, y también más suave será la variación entre los valores de la potencia pronosticada. Lo anterior indica que se seleccione un valor pequeño de α (≤ 4). El controlador de demanda permite cambiar el valor de α en cualquier momento.

5.4.1 Cálculo de la demanda en el medidor ION8500 de Schneider Electric

El módulo del medidor ION8500 [17] que calcula la demanda con ventana deslizante es muy versátil ya que permite definir el tamaño de la ventana (SubIntvl) la cual en México sería de 5 minutos y también permite variar el número de ventanas (#SubIntvls) que se incluirán en el cálculo de esa demanda. En el caso de México sería de 3 ventanas. Lo anterior indica que la longitud del intervalo utilizado para el cálculo de la demanda, es el producto del tamaño de la ventana por el número de ventanas que agrupa ($\#SubIntvls * SubIntvl$).

La forma como realiza el cálculo de la demanda pronosticada para cualquier instante t_i es con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(\#SubIntvls - 1)(Pot. prom. anterior) + Acumulada + (Promedio Térmico)(Tiempo faltante)}{Período Total de la ventana deslizante} \\
 &= \frac{(3 - 1)(Pot. prom. anterior) + A_3 + (Promedio Térmico)(5min - t_i)}{15min} \\
 &= \frac{(A_1 + A_2) + A_3 + A_4}{15min} \tag{5-21}
 \end{aligned}$$

El objetivo es obtener el área total bajo la curva donde las áreas A₁, A₂ y A₃ son conocidas y el A₄ se tiene que pronosticar, como lo muestra la Figura 5-28.

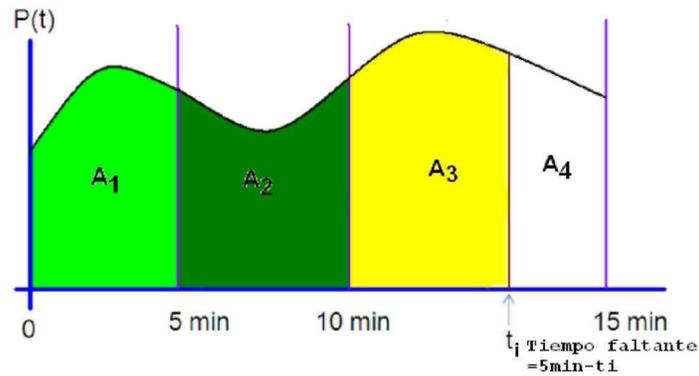


Figura 5-28. Áreas que involucran el cálculo de la demanda.

Para pronosticar el área A₄ lo hace en base a un parámetro que llama “Promedio Térmico” que se interpreta como la altura promedio que se pronostica habrá en ese tiempo faltante. El área A₄ se obtiene multiplicando “Promedio Térmico”*(Tiempo_faltante).

El promedio térmico se obtiene de la siguiente ecuación:

$$PromTermico_{K+1} = \frac{PromTermico_K * (BasePronostico - 1) + Potencia_K}{BasePronostico} \quad (5-22)$$

El parámetro “BasePronostico” está en función de un valor que define el usuario que puede ir de 0 a 100 y que se sugiere que sea 70.

Aquí la idea importante es que la ecuación anterior se puede reescribir de la forma siguiente:

$$PromTermico_{K+1} = \alpha * Potencia_K + (1 - \alpha) * PromTermico_K \quad 5-23$$

Observando esta ecuación y comparándola con la ecuación del método de pronóstico de suavización exponencial, vemos de que se trata precisamente de la aplicación de este método para realizar sus pronósticos de potencia con la diferencia de que ellos realizan sus cálculos cada segundo mientras que el controlador de demanda que se diseñó, lo hace cada 15 segundos.

$$Ppro_{t+1} = \alpha Pi_t + (1 - \alpha) Ppro_t \quad 5-24$$

5.5 Hardware y software

5.5.1 Selección del microcontrolador

El microcontrolador fue seleccionado en base a los recursos que se tenían disponibles en el laboratorio, como lo es la tarjeta de desarrollo para ser utilizada con los microcontroladores PIC18 de 40 terminales del fabricante Microchip (www.microchip.com). A la clase PIC18 pertenecen los microcontroladores de 8 bits con mayor funcionalidad y mayor rendimiento. Dentro de la clase PIC18 se seleccionó un micro con alta capacidad de memoria RAM para guardar el programa, ya que no se sabía el espacio que se iba a requerir. El micro con el que se construyó el controlador de demanda fue el PIC18f4680 que tiene una capacidad de memoria de 64kbytes para almacenar el programa, una memoria SRAM de 3328 bytes y otra EEPROM de 1024 bytes donde ambas son para almacenar datos, la primera en forma volátil y la segunda en forma no volátil.

La tarjeta de desarrollo contiene el hardware para la comunicación serial con la computadora. Las laptops actuales ya no cuentan con puertos seriales por lo que se requirió de un cable adaptador serial-usb para realizar la comunicación y programación del micro. Se utilizó el cable adaptador USB-SER fabricado por Steren. El micro se programó la primera vez utilizando el programador Pickit-2 de Microchip. En esta primera programación se le cargó el programa “tiny pic bootloader” [18]. Este es un programa pequeño de menos de 100 bytes que permite realizar la programación del pic a través de la comunicación serial con la que ya contaba la tarjeta de desarrollo. Esto hacía más fácil el trabajar con la tarjeta de desarrollo ya que no había necesidad de quitar el micro para programarlo con el pickit-2, sino que a través del mismo puerto serial y en la misma tarjeta se reprogramaba.

5.5.2 Selección del software

El micro se programa básicamente en lenguaje ensamblador. Para facilitar la programación se buscó una opción más sencilla. Había varias opciones y dentro de las más utilizadas estaba programarlo en lenguaje basic o en lenguaje C. Se optó por la programación en basic utilizando un lenguaje llamado PicBasicPro (melabs.com). Este es un lenguaje muy sencillo y facilitó muchísimo la programación del pic. Una desventaja tiene es que para el manejo de interrupciones, no las acepta hasta que la instrucción de basic que se está ejecutando sea terminada. Por ejemplo, si se trata de una “pause 100” (100mseg), y llega una interrupción, esta se aceptará hasta que hayan pasado los 100mseg. El programa diseñado no utiliza manejo de interrupciones por la cual el lenguaje PicBasicPro funcionó bien, aunque claro debido a esto, ciertas partes del programa resultaron más complicadas.

El software de la PC se programó dentro del Excel utilizando el lenguaje Visual Basic que existe en él. Para la comunicación con el micro se hizo uso de las librerías de comunicaciones NETCommOCX [19]. Las instrucciones con que cuenta, facilitaron la comunicación entre el pic y el VisulBasic del Excel.

Para la programación en PicBasicPro se utilizó la plataforma MPLAB IDE v8.63 de Microchip. El programa en hexadecimal que se generaba, se transmitía al micro utilizando el programa de Tiny Bootloader utilizando la misma tarjeta de desarrollo y sin necesidad de quitar el micro para colocarlo en el quemador.

Para construir el diagrama esquemático del circuito se utilizó el ISIS del paquete Proteus desarrollado por Labcenter Electronics (www.labcenter.com). El ISIS también sirvió para realizar simulaciones de lo programado antes de pasarlo al microprocesador. Para el diseño y construcción de las tarjetas el mismo software Proteus cuenta con el ARES. Con este software se generaron los archivos que posteriormente se cargaron a la máquina que se construyó la tarjeta del circuito impreso.

6 Diseño e implementación del sistema controlador de demanda

6.1 Descripción de su funcionamiento

El dispositivo diseñado controla la demanda máxima eléctrica en empresas conectadas a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) principalmente en tarifa O-M y pudiera ser utilizado en la tarifa H-M. La tarifa O-M se caracteriza por tener el mismo costo de la energía a lo largo del día y una demanda en media tensión menor a los 100kW. CFE, aparte del consumo de energía activa, energía reactiva y factor de potencia, hace un cargo en función de la demanda máxima, medida en kW que se haya tenido durante el período de facturación. Esta medición es el valor máximo que se obtiene de sacar la potencia promedio consumida durante 15 minutos continuos y con un deslizamiento en el tiempo de 5 minutos para cada medición como se observa en la Figura 6-1 y que se describe en la ecuación ((6-1)). Cualquier fracción de kWatt en la medición de la demanda máxima se tomará por CFE como kW completo. En enero del 2012 el cargo es de \$152.90 por cada kWatt de demanda máxima medida [7].

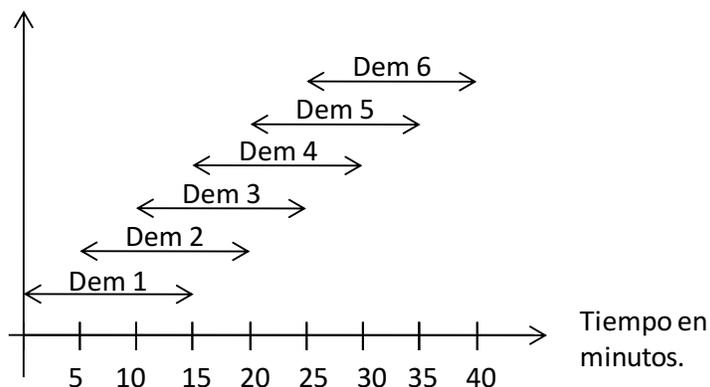


Figura 6-1. Medición de la demanda en intervalos de 15 minutos.

$$\text{Demanda máxima} = \max (\text{Dem 1}, \text{Dem 2}, \text{Dem 3}, \dots) \quad (6-1)$$

El objetivo del dispositivo es tratar de que no se rebase el valor de la demanda máxima que haya puesto como límite el usuario. Esto se logra controlando el encendido y apagado de hasta ocho cargas de la empresa. Conforme se acerca la demanda al nivel establecido se irán apagando las cargas y conforme vaya disminuyendo esta demanda se irán ahora encendiendo esas cargas que se tuvieron que apagar. Siempre se procurará que la potencia consumida en un momento dado sea menor a la máxima demanda establecida.

El controlador de demanda también va registrando en su memoria la potencia consumida y el estado de las ocho cargas (encendidas o apagadas), valores que almacena cada 15 segundos. También se almacena cada 5 minutos, la demanda registrada en los 15 minutos anteriores. El dispositivo tiene capacidad de transferir todos estos valores registrados a una computadora personal (PC) y a través de un programa que también se diseñó, poder graficar y analizar toda esta información. La información se grafica contra el tiempo para saber con precisión en que momentos se rebasó la máxima demanda establecida en caso de que esto hubiera sucedido así como la variación de la potencia consumida en el tiempo a intervalos de 15 segundos.

Finalmente, el dispositivo también permite el control de encendido y apagado de cargas en tiempos preestablecidos para llevar un control por horario de las mismas.

6.2 Diagrama de bloques del controlador

El controlador de demanda, recibe del medidor de energía una cantidad de pulsos que es proporcional a la energía que se esté consumiendo. Tiene una sección de potencia que activa hasta 8 relevadores que son los que encienden o apagan las cargas que se desean controlar. Finalmente se puede conectar a la computadora personal ya sea para transferir información recabada sobre el consumo de potencia o bien enviar o recibir la programación del control de las cargas. Su diagrama de bloques se muestra en la Figura 6-2.

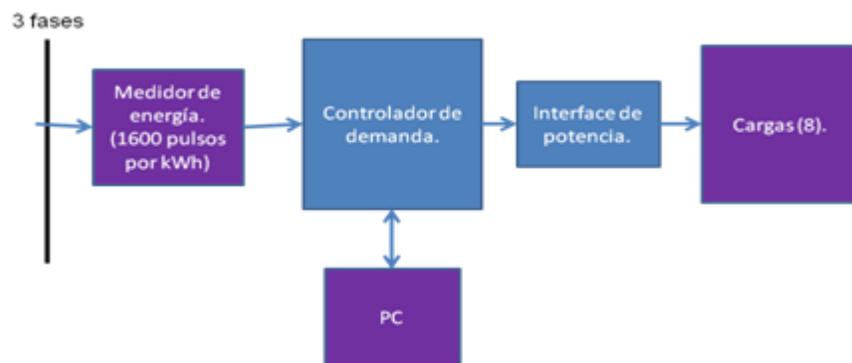


Figura 6-2. Diagrama de bloques del controlador de demanda

6.3 Medición del consumo de energía

El objetivo del dispositivo es el control de la demanda por lo cual se partió de que ya se cuenta con un aparato medidor de energía trifásica. Estos medidores generan una cantidad de pulsos “secos” (apertura y cierre de contactos) en función de la energía consumida. El modelo utilizado en las pruebas fue el modelo DTS238 [20] mostrado en la Figura 6-3, el cual genera una razón de 1600 pulsos por cada kWh de energía consumida por las tres fases. Cada pulso es generado manteniendo cerrado el interruptor de salida por aproximadamente 90 mseg.



Figura 6-3. Medidor trifásico de energía utilizado en el proyecto.

Lo primero que hace el controlador es convertir cada pulso en un cambio de nivel de voltaje, que son en los que se basa el microcontrolador para llevar a cabo el control de la demanda máxima.

6.4 Etapa de entrada de los pulsos del controlador de demanda

En esta etapa se convierten a nivel de voltaje los pulsos secos que genera el medidor de energía. Para ello se utiliza el circuito de la Figura 6-4.

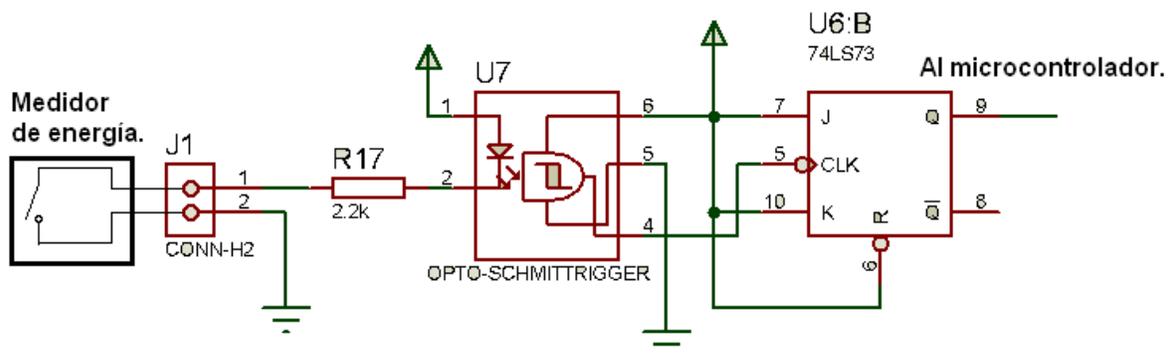


Figura 6-4. Circuito convertidor de pulsos a cambio de nivel de voltaje.

Se aprecia en el circuito que cada vez que el medidor de energía cierra el interruptor, el led del optoaislador (NTE3090) se enciende. Esto activa la entrada de la compuerta Schmitt-Trigger y su salida se va a 5 volts. Al abrir el interruptor, el led del optoaislador se apaga y hace que la salida de la compuerta nuevamente se vaya a cero. La salida del optoaislador se pasa por un flip-flop J-K (74LS73) que convierte cada pulso de la señal de entrada en un cambio de nivel en la señal de salida como lo muestra la Figura 6-5. Esto es con el objetivo de disponer de más tiempo para detectar el pulso y no estar sujetos a los 90 ms de duración

del mismo. Recordar que en la programación del micro, no se trabajan con interrupciones si no que se está leyendo el puerto de entrada en forma continua para detectar los cambios de nivel.

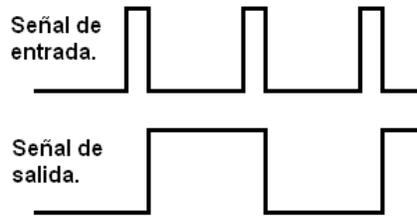


Figura 6-5. Los pulsos del medidor se convierten en cambios de nivel de voltaje.

6.5 Descripción del microcontrolador

El microcontrolador utilizado para el diseño del controlador de demanda fue el PIC18f4680 de Microchip (www.microchip.com). Es de los más grandes del grupo de 8 bits. La Figura 6-6 describe los diferentes tipos de pics que existen. Se escogió este micro más que todo por la capacidad de memoria ya que se desconocía la cantidad requerida para almacenar las instrucciones del programa. Este micro tiene una capacidad de memoria flash de 64 kbytes para almacenar el programa, una memoria SRAM de 3328 bytes y otra EEPROM de 1024 bytes donde ambas son para almacenar datos, la primera en forma volátil y la segunda en forma no volátil.

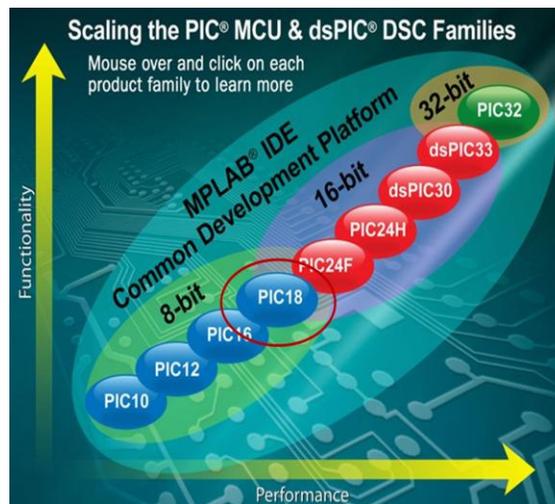


Figura 6-6. Tipos de microcontroladores de Microchip.

6.6 Conexión del micro con el display y el teclado

Se le conectó al microcontrolador un display y un teclado para permitir la comunicación bidireccional con el usuario. En la Figura 6-7, muestra la conexión entre el display y el teclado al microcontrolador.

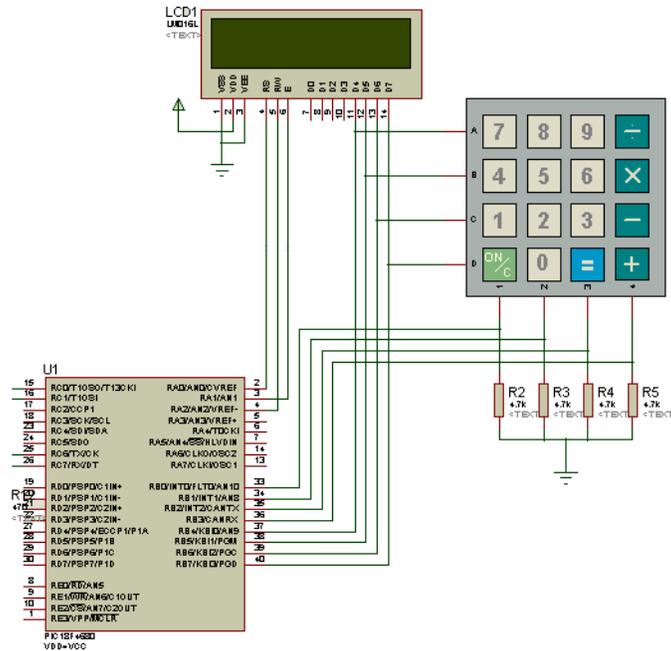


Figura 6-7. Conexión del micro con el display y el teclado.

6.7 Comunicación serial I2C

Los dispositivos utilizados en el diseño del controlador como el reloj de tiempo real (DS307), la memoria de 512 kilobytes (24FC512) y el expansor serial (MCP2307), realizan la comunicación con el microcontrolador utilizando el protocolo I2C. La ventaja de esta forma de comunicación es que es serial por lo que solo requiere de dos cables para la transferencia de datos entre ellos como se aprecia en la Figura 6-8.

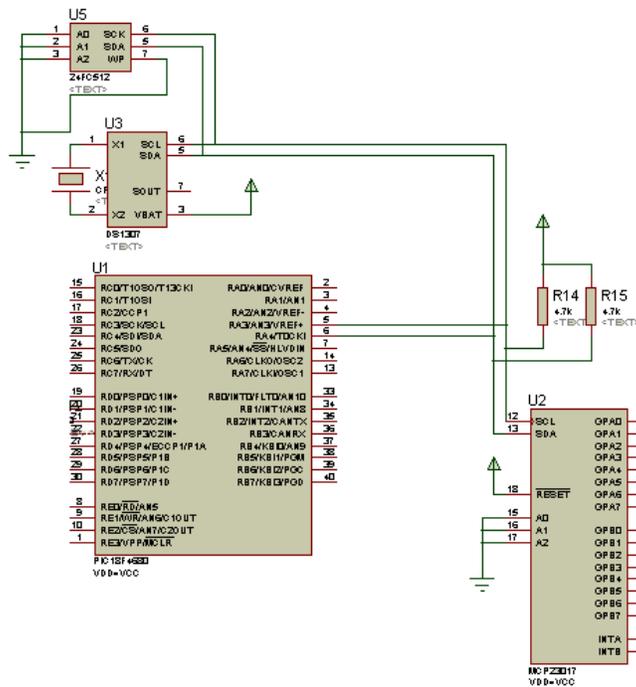


Figura 6-8. La comunicación entre componentes del micro es serial con el protocolo I2C.

6.8 Comunicación RS-232

El controlador de demanda se puede comunicar en forma serial y bidireccional con el PC utilizando el protocolo RS-232 a través del conector J10. El circuito se muestra en la Figura 6-9. El conector J13 se utiliza para proporcionar una salida serial del estado de cada una de las ocho cargas (1/0=on/off) cada vez que ocurre un cambio en su estado con propósito de poder agregar en un futuro un transmisor inalámbrico para el control de las cargas.

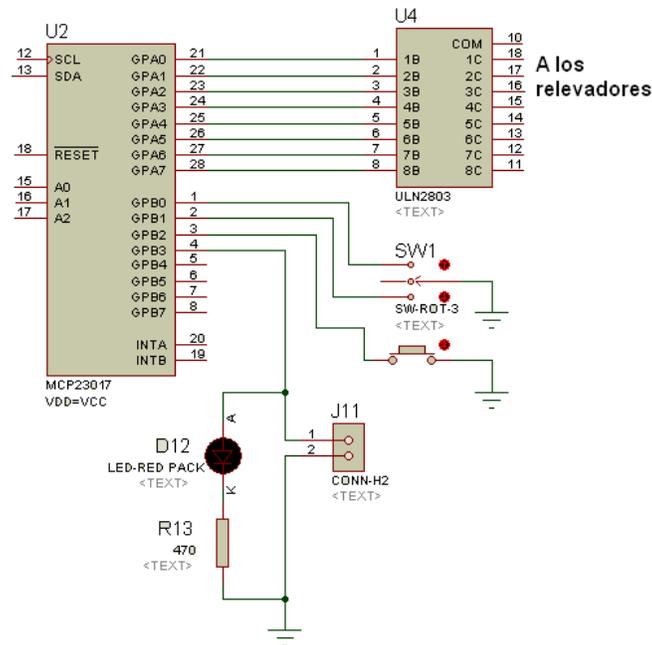


Figura 6-10. Conexión entre el expansor (U2) y el amplificador (U4).

El circuito amplificador (driver U4) facilita la interconexión con los relevadores (RL1...8) ya que incluye internamente los diodos de rueda libre requeridos para el control de los relevadores. Se agregó al circuito unos leds indicadores para señalar en forma visual el estado de cada relevador. Se decidió que cuando el relevador no esté energizado la carga se encuentre activada. Lo anterior para que en caso de que el circuito controlador se desconecte o se dañe, todo permanezca activado y las cargas puedan ser manejadas en forma manual sin necesidad de realizar desinstalaciones eléctricas. La carga está conectada al contacto normalmente cerrado (NC) del relevador. El circuito de la Figura 6-11, solo muestra la conexión de las cargas 6 y 7. El resto de las cargas llevan el mismo tipo de conexión eléctrica.

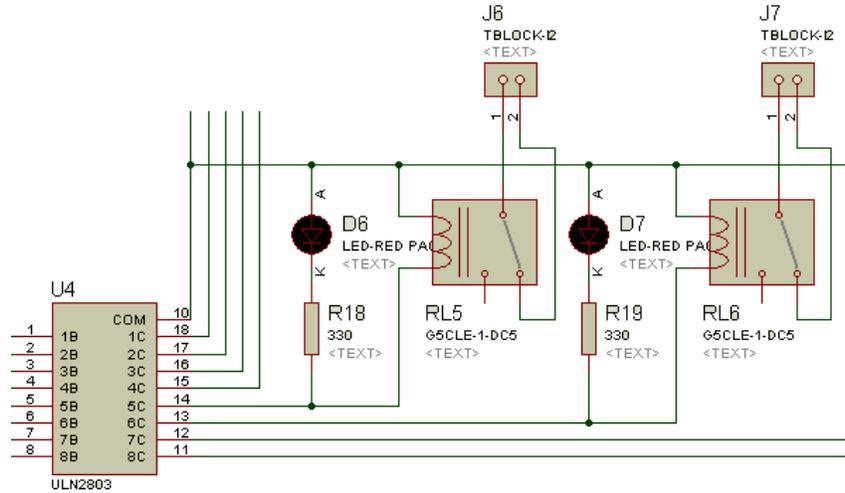


Figura 6-11. Control de los relevadores.

6.10 Circuito del controlador de demanda

La Figura 6-12, muestra todos los elementos del controlador de demanda.

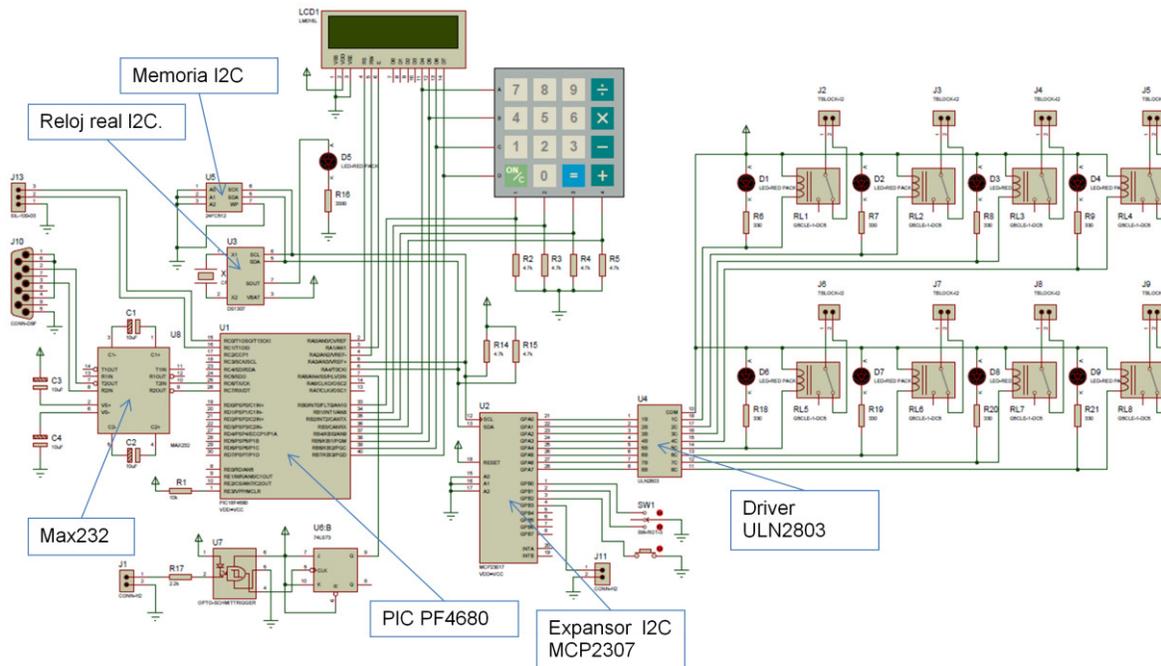


Figura 6-12. Circuito del controlador de demanda.

6.11 Tarjetas de circuito impreso (PCB) del controlador demanda

Se diseño y construyó la tarjeta impresa de la sección de potencia, la cual quedó de la forma como se muestra en la Figura 6-13. Para la demostración del

funcionamiento del controlador de demanda, solo se colocaron cuatro relevadores para el control de cuatro cargas de los ocho que pueden ser soportadas por el controlador.

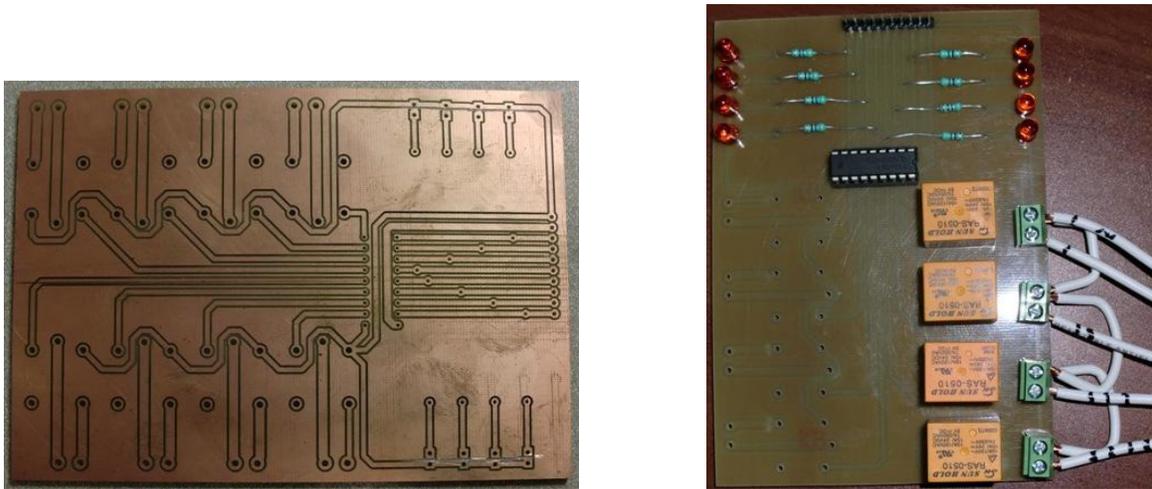


Figura 6-13. Tarjeta impresa con solo los componentes para cuatro cargas.

Para la sección del microcontrolador, se utilizó una tarjeta básica ya construida como lo muestra la Figura 6-14.

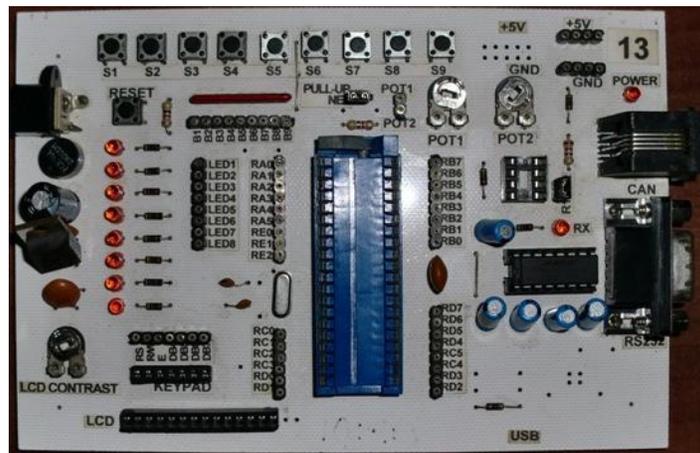
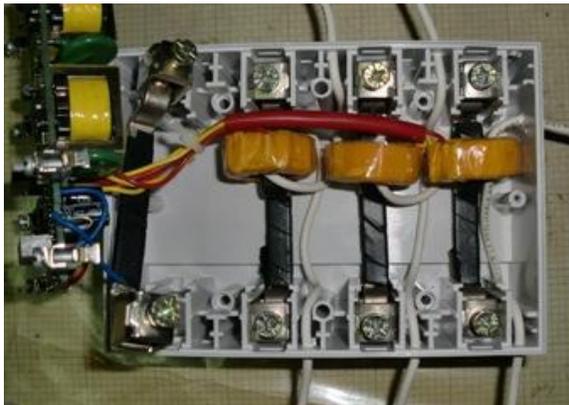


Figura 6-14. Tarjeta básica para uso de los microcontroladores PIC18 de Microchip.

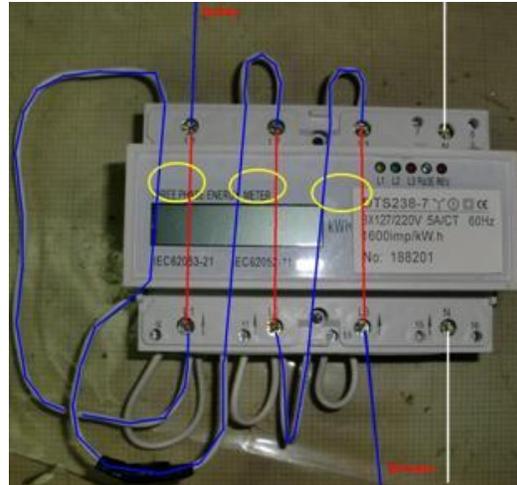
6.12 Modificación del medidor de energía

Con el objeto de que el medidor de energía registre una mayor potencia para una misma carga (genere una mayor cantidad de pulsos por kWh) se le realizaron las siguientes modificaciones: A) Se agregó una segunda vuelta a cada una de las tres bobinas de corriente con el objeto de registre el doble de pulsos por fase, Figura 6-15(A). B) Como las cargas de prueba (focos de 100W) eran monofásicas, se hizo pasar la misma corriente por cada una de las tres bobinas de corriente, es

decir, se conectaron en forma serial lo cual hace que para una misma carga se registre el triple de pulsos, Figura 6-15(B). Todo lo anterior logra que el medidor de energía incremente en un factor de seis la cantidad de pulsos de energía correspondiente a la carga que se le conecte.



(A)



(B)

Figura 6-15. Modificación del medidor de energía.

Al conectar como carga un foco de 100 Watts, el medidor de energía registrará una cantidad de pulsos correspondientes a una carga de 600 Watts.

6.13 Tablero de cargas

Se construyó un tablero que contiene el medidor de energía y cuatro focos de 100W cada uno, los cuales simularán cada una de las cuatro cargas que se desean controlar. Se agregó a cada foco dos interruptores, uno está en serie con el foco y el otro está en paralelo con el interruptor del relevador correspondiente, tal y como lo muestra la Figura 6-16. El interruptor en serie es para permitir desconectar un foco lo cual equivaldría a disminuir la demanda. El interruptor en paralelo es para puentear el relevador y permitir encender un foco lo cual equivaldría a incrementar la demanda. Todo esto con el fin de probar el algoritmo de control de cargas ante diferentes cambios en la demanda.

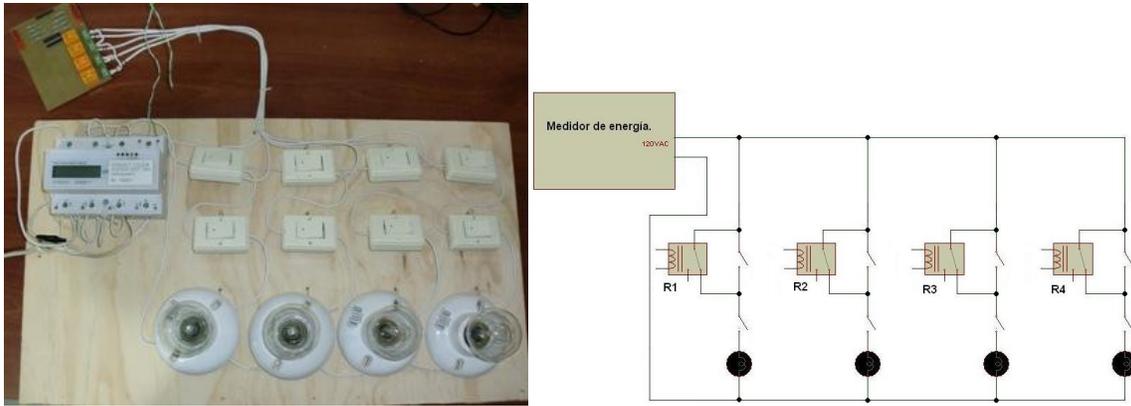


Figura 6-16. Tablero de carga con cuatro focos de 100 Watts.

6.14 Prototipo final del controlador de demanda

En la Figura 6-17, se presenta la foto de todo el prototipo del controlador de deamnda con el que se comprobaran las funciones de control implementadas.

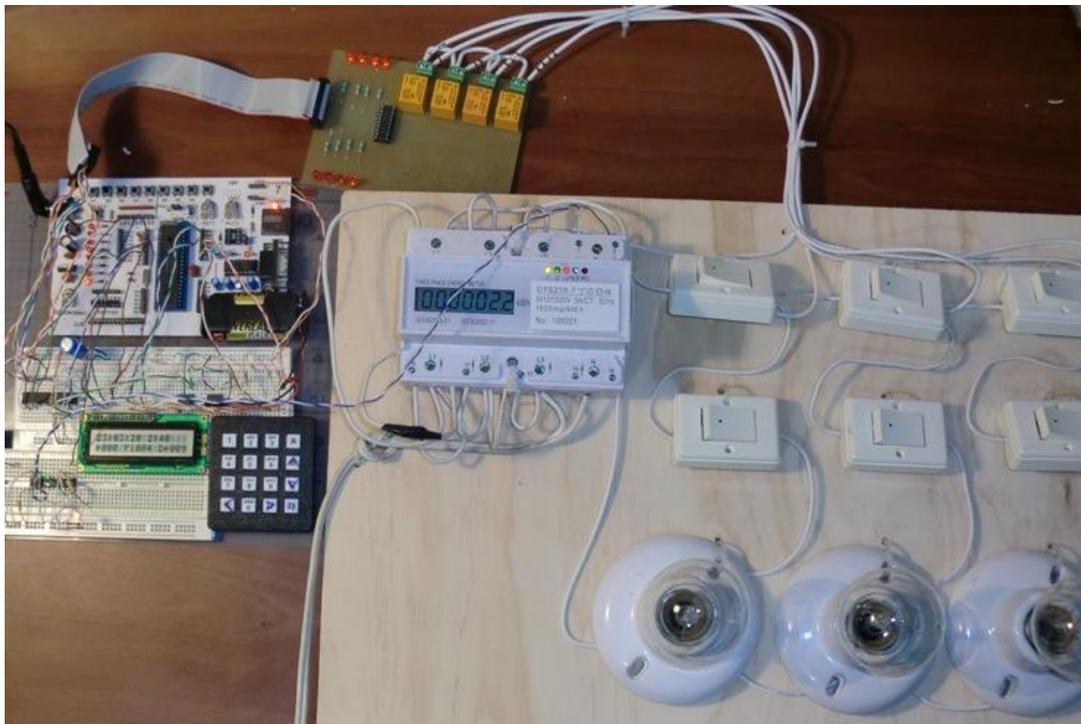


Figura 6-17. Prototipo total del proyecto.

7 Operación del controlador de demanda

En esta sección se describen cada uno de los elementos del controlador de demanda y las diferentes opciones que se tienen para el control de las cargas. También se describen los algoritmos utilizados en la operación del controlador.

7.1 Medición de energía

La operación del controlador de demanda se basa en los pulsos que le llegan del medidor externo de energía. Como ya se comentó, lo primero que se hace es convertir cada pulso que llega del medidor de energía a un cambio de nivel de voltaje.

La etapa de entrada del controlador cuenta la cantidad de pulsos completos que llegan del medidor (cambios de nivel dentro del controlador) durante intervalos de tiempo con longitud de 15 segundos. En la Figura 7-1 se señala el contador de los pulsos que llegan, cada que llega un pulso el valor se actualiza. La cantidad total de pulsos que llegaron en los 15s es proporcional a la cantidad de energía que se consumió en ese intervalo de tiempo. Se tendrá en la medición un error máximo de un pulso, ya que se cuenta los pulsos completos que se hayan recibido. La energía correspondiente a un pulso que llega, se contabiliza en el intervalo de tiempo donde este pulso termine de llegar completamente y no importa que la mayor parte de la energía de este pulso se haya consumido en el intervalo de tiempo anterior. Hay que tener en cuenta que entre más pulsos lleguen en un intervalo de tiempo, el error de un pulso en forma relativa, irá disminuyendo.

La tarifa de Comisión Federal de Electricidad (CFE) a la que va dirigido el controlador de demanda va dirigido a la tarifa O-M aunque también podría utilizarse en la tarifa H-M. En la tarifa O-M se maneja una demanda máxima de 100kW. Si la demanda máxima rebasa este valor se pasaría a la tarifa HM [7] la cual ya no trabaja un solo horario si no que tres que son el base, el intermedio y el de punta.



Figura 7-1. Pulsos que han llegado en el intervalo actual de 15 segundos.

El medidor de energía utilizado en el prototipo genera 1600 pulsos por kWh. Esto significa que por cada kWh consumido durante una hora, se recibirán durante

cada 15 segundos de medición, un promedio de 1600pulsos/60min/4intervalos de 15seg = 6.67 pulsos. En este caso el error que se podría tener en la medición de la energía en los 15 segundos por la llegada de un pulso incompleto es la energía equivalente a un solo pulso que equivale a 2.25kWs, valor que se obtiene con siguiente ecuación.

$$\frac{1kWh}{1600p} * \frac{3600s}{1h} = 2.25 \frac{kWs}{pulso} \quad (7-1)$$

Para una demanda de 25kWh, se recibirían en promedio 1600X25/60/4=166.67 pulsos cada 15 segundos. En este caso el porcentaje de error relativo por un pulso incompleto sería de 1/166*100=0.6%, que es un error muy pequeño (<1%) y además conforme la demanda promedio incrementa todavía este error por pulso incompleto irá disminuyendo. Con los pulsos recibidos, el controlador de demanda obtiene la potencia promedio consumida durante cada 15 segundos. Para ello se multiplican los pulsos que llegaron durante los 15 segundos, por la energía que mide cada pulso y se divide este resultado entre los 15 segundos para obtener el promedio. Finalmente se redondea la cantidad a unidades enteras de kW. Esta potencia promedio obtenida, el controlador la despliega en la pantalla como lo muestra la Figura 7-2. Este valor se actualiza cada 15 segundos.

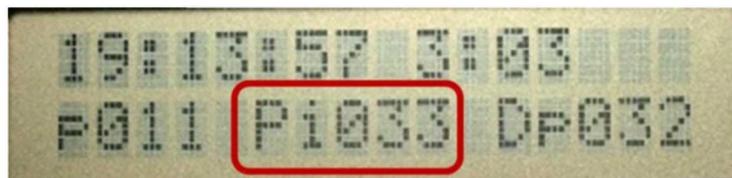


Figura 7-2. Potencia promedio en el último intervalo de 15 segundos.

Como ejemplo, suponer que llegaron 167 pulsos completos en los 15 segundos. Esto equivale a 167pulsos*2.25kWs/pulso*1/15s=25.05kW y se redondea a 25 kW, que es el valor que se desplegaría en la pantalla del controlador.

Los medidores comerciales pueden generar diferente cantidad de pulsos por kWh de energía consumida, ante esto, el controlador de demanda permite hacer el ajuste de esta cantidad de pulsos a través del parámetro "Ka" que indica los cientos de pulsos que se generan por kWh. Se tomó como base un medidor de energía que genera 100 pulsos por kWh. En la Figura 7-3, se señala el multiplicador que está utilizando el controlador el cual podrá ser modificado en función del medidor que se le conecte. El medidor de energía utilizado por el controlador de demanda en el prototipo genera 1600 pulsos/kwh, por lo cual se tendrá que colocar un valor de Ka=16. Este es una de los ajustes necesarios que debe realizarse en el controlador de demanda antes de ser utilizado.

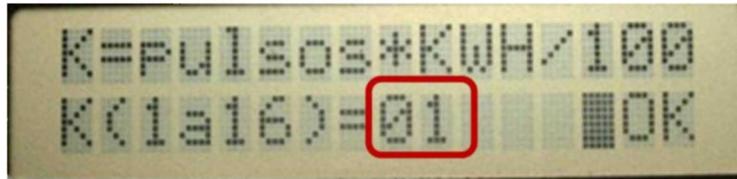


Figura 7-3. Cientos de pulsos que genera el medidor de energía utilizado. Para el caso de 100 pulsos/kWh el valor es K=1.

En base al medidor de energía de 100 pulsos/kWh y del multiplicador (K_a) para poder operar con los demás medidores comerciales, se obtiene la energía a que equivale cada pulso generado por este medidor, como lo muestra la siguiente ecuación.

$$\text{Energía de cada pulso} = \frac{1}{100 * K_a} (\text{kWh}) \quad (7-2)$$

La potencia promedio (P_t) de cada 15 segundos, dada en kW, se obtiene multiplicando los pulsos que llegaron en ese tiempo por la cantidad de intervalos de 15 segundos que hay en una hora (lo que equivale a los pulsos que llegarían en una hora) y se multiplican por la energía de cada pulso, tal como se hace en la siguiente ecuación.

$$P_t(\text{kW}) = [Pul_{15s}(\text{pulsos})] * \left[3600 \left(\frac{\text{seg}}{\text{hr}} \right) \frac{1}{15(\text{seg})} \right] * \left[\frac{1}{100 * K_a} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{pulsos}} \right) \right] \quad (7-3)$$

Simplificando la ecuación anterior queda la que es utilizada dentro del controlador de demanda, la cual se muestra a continuación.

$$P_t(\text{kW}) = Pul_{15s} * \frac{3600}{15} * \frac{1}{100 * K_a} = \frac{36 * Pul_{15s}}{15 * K_a} \quad (7-4)$$

La medición de la potencia promedio en kW obtenida cada 15 segundos (P_t) se utiliza para pronosticar la potencia que se tendrá en los siguientes 15 segundos utilizando el método de suavización exponencial ya descrito y que se basa en la siguiente ecuación.

$$P_{pro_{t+1}} = \alpha P_t + (1-\alpha)P_{pro_t} \quad (7-5)$$

Aquí, P_t es la potencia promedio recién obtenida en base a los pulsos que llegaron en los anteriores 15 segundos. P_{pro_t} , es la potencia promedio que se pronosticó en el intervalo anterior para esta potencia recién obtenida. $P_{pro_{t+1}}$, es la potencia promedio que se pronostica que se tendrá en los siguientes 15 segundos, todos estos valores están dados en kW. El valor de alfa (α), es la credibilidad que se la da a la potencia promedio recién medida y tiene que tener un valor entre cero y uno. Si tomara el valor de uno, quedaría que la potencia pronosticada sería el mismo valor de la potencia actual. El controlador permite la variación de este valor de α como lo muestra la Figura 7-4. EL valor de α se

introduce al controlador en forma entera con un valor entero entre 1 y 9, lo que significa que internamente el controlador lo considera como un valor entre 0.1 y 0.9.

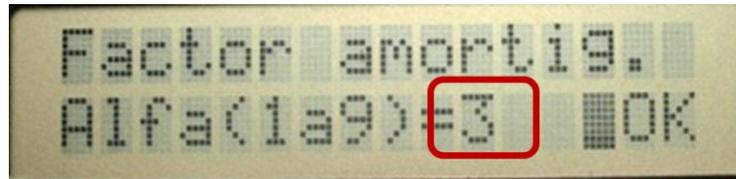


Figura 7-4. Factor de amortiguamiento α .

Como se comentó, entre más pequeño sea el valor de alfa, más se suaviza el cambio en el valor de la potencia pronosticada. En la Figura 7-5, se observa que los cambios de la potencia P_t son bruscos, mientras que los cambios en la potencia pronosticada $Ppro_t$ son mucho más suaves. Realmente el valor que importa es el valor de la potencia pronosticada pero en cada minuto, ya que es este valor de potencia uno de los valores en los que se basa el controlador de demanda para encender o apagar las cargas que son controladas.

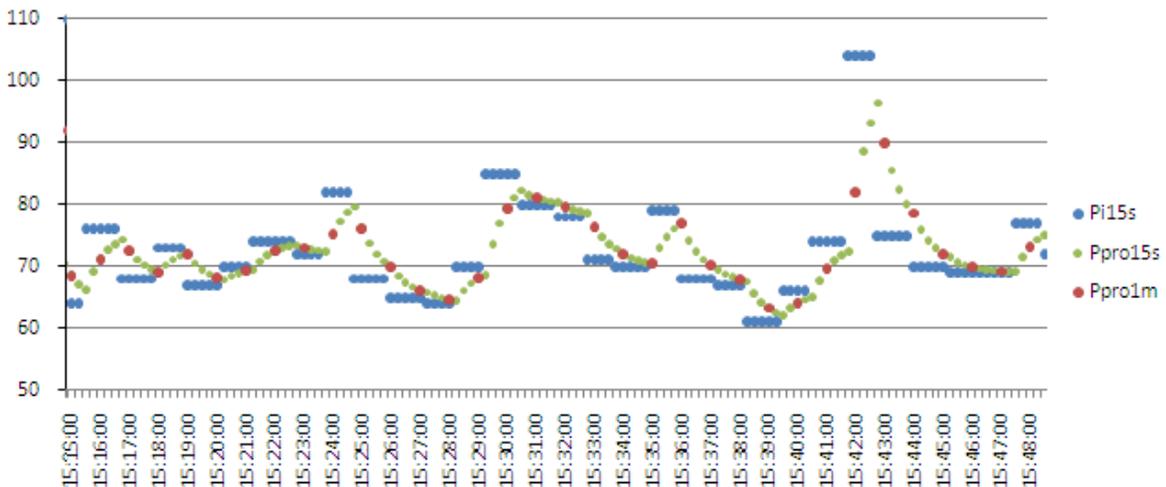


Figura 7-5. Variación de la potencia P_t contra la variación de la potencia pronosticada $Ppro_t$ con un valor de alfa igual a 0.3.

7.2 Cálculo de la demanda pronosticada

Cada 15 segundos el controlador de demanda realiza el cálculo de la potencia pronosticada $Ppro$, pero es la potencia pronosticada que se obtiene cada minuto la se utiliza para el control de las cargas. Las potencias pronosticadas calculadas en 15, 30 y 45 segundos, solo indican la variación suavizada de esta potencia ante sus cambios bruscos del valor de la potencia instantánea.

El cálculo de la demanda por parte de CFE, se obtiene sacando el promedio de la potencia consumida durante 15 minutos, pero recordar que se hace con un deslizamiento de 5 minutos, es decir, se evalúa cada 5 minutos en base al consumo de los 15 minutos anteriores. Para obtener el valor de la demanda pronosticada, se considera que los dos primeros subintervalos de 5 minutos ya pasaron y que se está siempre sobre el tercer subintervalo de 5 minutos. Esto hace que solo se disponga de este tercer subintervalo de 5 minutos para realizar decisiones sobre el control de la operación de las cargas.

Para obtener el valor de la demanda pronosticada cuyo cálculo se realiza cada 15 segundos durante el tercer subintervalo de 5 minutos, es necesario obtener el área total bajo la curva que se tiene en el intervalo de 15 minutos. En la Figura 7-6, se grafican las diferentes áreas. El valor de las áreas A1 y A2 es ya conocido pues hablan de un tiempo pasado. El controlador siempre mantiene en memoria el valor de la energía acumulada por los dos últimos subintervalos de 5 minutos. El área total del tercer subintervalo, está compuesta por el área A3 que es sobre un tiempo ya pasado y el área A4 que es sobre el tiempo que falta para completar ese subintervalo de cinco minutos y que es el área que se tiene que pronosticar.

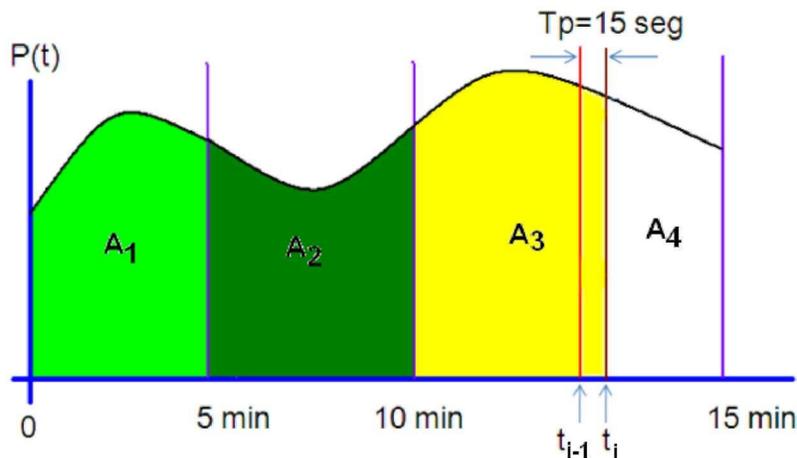


Figura 7-6. Gráfica del consumo de energía para tiempo t_i en un intervalo de 15min.

La ecuación para obtener la demanda pronosticada que se tendría al completar el intervalo de 15 minutos y que es ejecutada cada 15 segundos es la que se presenta a continuación.

$$\text{Demanda pronosticada} = (A1 + A2 + A3 + A4)/15\text{min} \quad (7-6)$$

El área A3 se obtiene sumando el área que se tiene acumulada hasta tiempo t_{i-1} más el área $A t_i$ que es el área de los últimos 15 segundos. El controlador va acumulando la suma de estas áreas y en cada tiempo t_i (cada 15 segundos) actualiza el área A3. El valor de i indica el número de veces que el tiempo ha

tenido desplazamientos de 15 segundos dentro del tercer intervalo de 5 minutos y comienza valiendo 1 para terminar con un valor de $300\text{seg}/15=20$. El cálculo de A3 se realizaría de la forma siguiente.

$$A3 = \sum_{j=1}^i At_i \text{ donde } i = 1, 2, 3, \dots, 20 \quad (7-7)$$

A4, es la área que se tiene que pronosticar. Esta se obtiene en base a la potencia promedio que se pronosticó que habrá en el tiempo t_{i+1} cuyo valor se comentó se obtiene con la ecuación $P_{pro_{t+1}} = \alpha P_t + (1-\alpha)P_{pro_t}$. Esta potencia pronosticada se considerará como la altura promedio en toda esa área restante. El valor del área A4 se calcula por lo tanto, multiplicando la potencia promedio pronosticada por el tiempo en segundos que falta para completar el tercer subintervalo de cinco minutos.

$$A4 = Pro_{t_{i+1}} * (20 - i) * 15 \text{ donde } i \text{ varía de } 1 \text{ a } 300\text{seg}/15=20 \quad (7-8)$$

Las operaciones se realizan utilizando la unidad de segundos ya que el intervalo de tiempo es en segundos también. La energía cubierta en cada una de las áreas se expresa en kW, por lo que la ecuación final para obtener la demanda que se pronostica es la siguiente ecuación.

$$\text{Demanda pronosticada} = (A1 + A2 + A3 + A4)/900\text{seg} \quad (7-9)$$

El cálculo de la demanda pronosticada se exhibe en la pantalla principal del controlador tal y como lo muestra la Figura 7-7. Su valor se actualiza cada 15 segundos aunque el valor que tiene uso para el control de las cargas es el que se obtiene cada minuto.

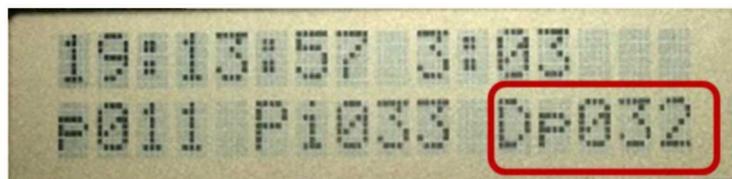


Figura 7-7. Demanda pronosticada y se actualiza cada 15 segundos.

Los otros valores mostrados en la pantalla principal es la hora en formato hh:mm:ss y el tiempo que falta para completar el tercer subintervalo de 5 minutos del intervalo de 15 minutos que son utilizados para el cálculo de la demanda pronosticada. Estos valores se muestran en la Figura 7-8.

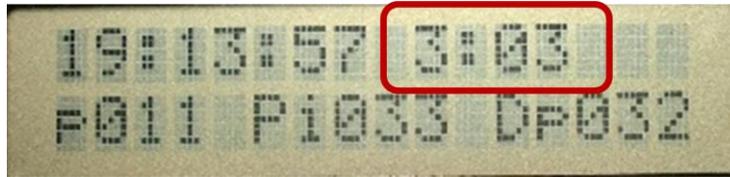


Figura 7-8. Tiempo que falta de los cinco minutos del tercer tercio del tiempo de demanda.

7.3 Demanda máxima y holgura permitida

En el apartado anterior se explicó la forma como el controlador evalúa la demanda pronosticada (D_{pro}) y que lo realiza cada 15 segundos. Para que el controlador de demanda realice su función de control sobre las cargas, es necesario que se le indique por parte del usuario, el valor de la demanda máxima permisible (D_{max}). Hay una pantalla en el controlador donde se permite realizar este ajuste, tal y como lo muestra la Figura 7-9. La demanda máxima permisible sirve como referencia para el control de la operación de las cargas. Básicamente, cuando la demanda pronosticada D_{pro} , se encuentre por debajo de la demanda D_{max} se podrán encender cargas y cuando la demanda D_{pro} sea mayor que la demanda D_{max} se tendrán que apagar cargas. La comparación entre las demandas D_{max} y D_{pro} las realiza el controlador solamente cada minuto y solo prende o apaga una carga a la vez.

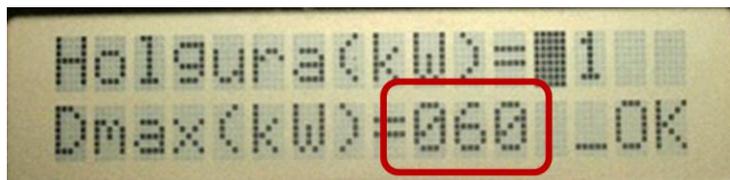


Figura 7-9. Ajuste de la demanda máxima permitida por el controlador de demanda.

Otro parámetro clave para el algoritmo de control para el control de las cargas es la holgura permitida con respecto a la demanda máxima permisible definida por el usuario (D_{max}). Esto es con el fin de introducir un lazo de histéresis para evitar en lo posible el que las cargas se prenda y se apaguen en forma cíclica, es decir se amplía el rango de la zona de tolerancia alrededor de la demanda máxima en que no hay necesidad de prender o apagar cargas como lo muestra la Figura 7-10.

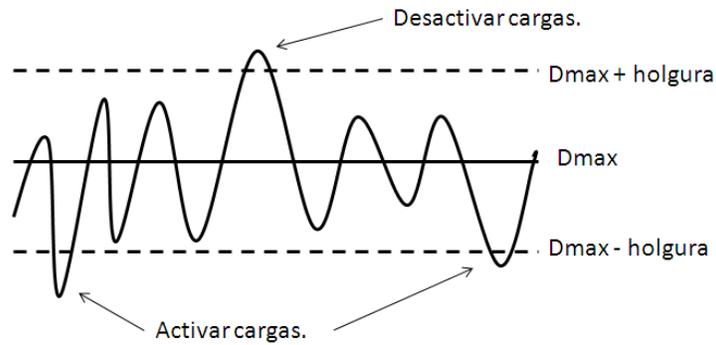


Figura 7-10. Aplicación del parámetro holgura.

El controlador de demanda permite establecer el valor deseado de holgura a través de la pantalla como lo muestra la Figura 7-11.

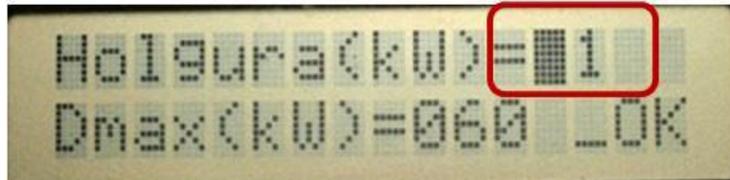


Figura 7-11. Ajuste de la holgura que utilizará el controlador de demanda.

7.4 Demanda máxima registrada

El controlador lleva también registro del máximo valor adquirido por la demanda pronosticada (D_{pro}) y ese valor se va almacenando en la variable D_{maxreg} , el cual en cualquier momento se podrá consultar a través de la pantalla mostrada en la Figura 7-12. La actualización de esta demanda máxima (D_{maxreg}), solo se lleva a cabo al finalizar el tercer subintervalo de 5 minutos y esto debido a que es en ese momento cuando la demanda pronosticada coincide con el valor de la demanda real. Si el valor obtenido es mayor que el valor registrado se actualiza el valor registrado y se actualiza también la fecha del momento en que sucedió. En la Figura 7-12(A) se presenta el diagrama de flujo. Esta fecha le permitirá al usuario identificar el momento en que se dio la demanda máxima. En la Figura 7-12(B) se presenta la pantalla del controlador en donde se presenta la demanda máxima registrada y el momento en que sucedió.

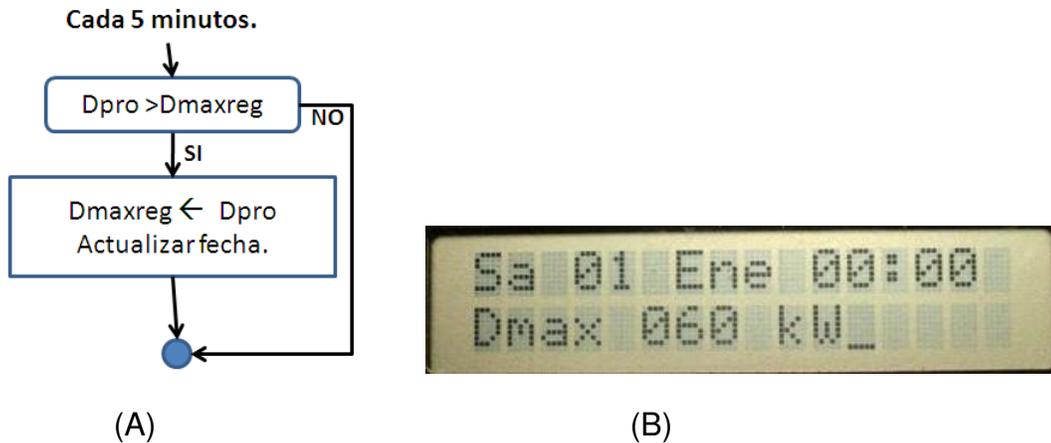


Figura 7-12. Valor de Dmaxreg y la fecha de su última actualización.

La pantalla que despliega el valor de Dmaxreg y el tiempo en que ocurrió, se pueden visualizar oprimiendo la tecla del número cero, siempre y cuando se esté desplegando en ese momento la pantalla principal. Con solo oprimir la tecla OK o bien esperar 5 segundos se regresará automáticamente a la pantalla principal.

7.5 Conexión de cargas al controlador de demanda

Al controlador de demanda le pueden ser conectadas hasta ocho cargas las cuales son controladas a través de ocho relevadores. Las terminales seleccionadas del relevador son las que normalmente están cerradas. En la Figura 7-13 se proporciona el circuito esquemático. El objetivo de tomar estas terminales es para que si el controlador es desconectado de la energía eléctrica, todas las cargas quedarán habilitadas para poder ser controladas directamente.

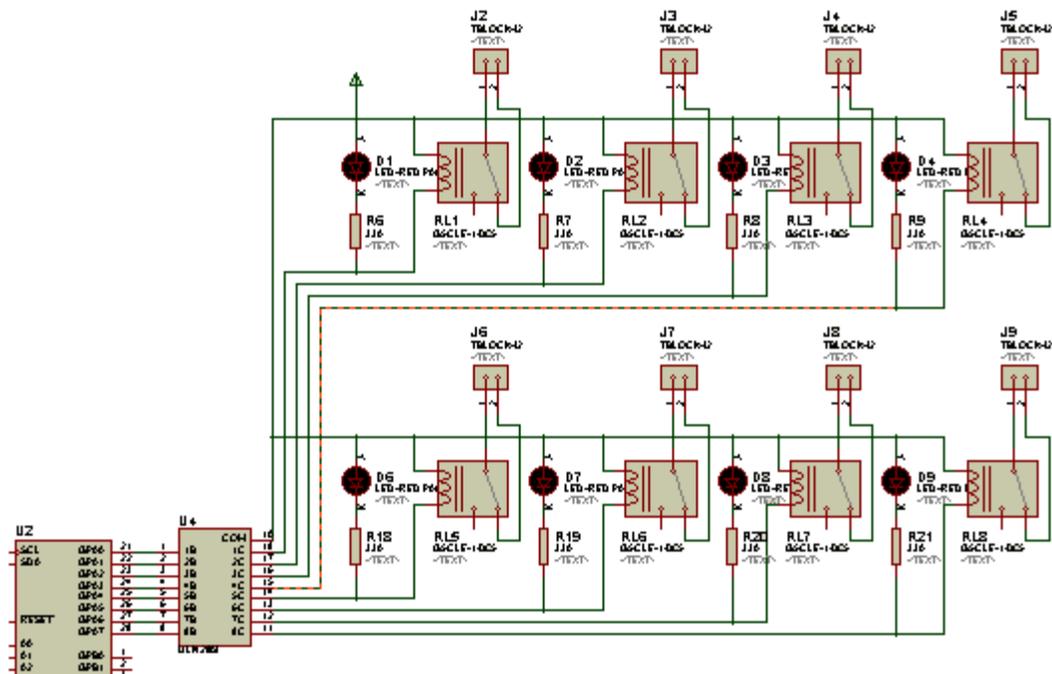


Figura 7-13. Circuito de potencia que controla hasta ocho cargas.

Cada vez que una carga nueva es conectada o cambiada por otra carga, es necesario actualizar el valor de esta nueva carga en el controlador proporcionando su valor en kW. El procedimiento se explica en la sección siguiente.

7.6 Asignación de la potencia a cada carga

Otro de los ajustes iniciales al controlador de demanda es la asignación del consumo de potencia de cada carga en kW. Esta información se utilizará a la hora de decidir si una carga se puede activar cuando la demanda pronosticada es menor que la demanda máxima. En la Figura 7-14 y en la Figura 7-15, se presentan las pantallas del controlador de demanda en donde pueden ser alteradas las potencias asignadas a cada una de las ocho cargas. Se inicia con un valor de 5 kW para cada una de las cargas.

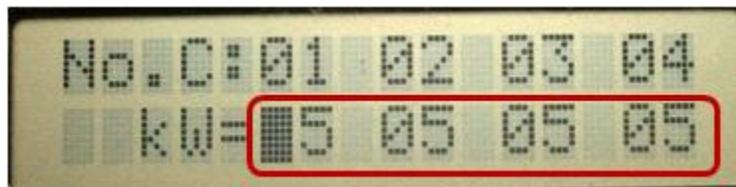


Figura 7-14. Asignación de potencia en kW en las cargas del 1 al 5.

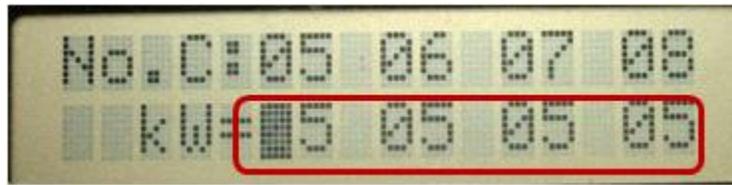


Figura 7-15. Asignación de potencia en kW en las cargas del 5 al 8.

7.7 Asignación de prioridad en el control de las cargas

El controlador tiene capacidad de controlar hasta ocho cargas y permite asignar una prioridad a cada una de ellas, como se muestra en la Figura 7-16. La línea superior de la pantalla indica cada una de las ocho cargas y la línea inferior es donde se escribe la prioridad que se le asignará a cada una de ellas. La prioridad varía de 1 a 8, donde el 1 indica la carga que tendrá mayor prioridad y el 8 señala la de menor prioridad. Todas las cargas deben tener diferente prioridad. Al inicio el controlador asigna a la carga uno la mayor prioridad y así sucesivamente hasta llegar a la carga ocho que es la de menor prioridad. Estas prioridades podrán ser alteradas por el usuario en cualquier momento y todas las cargas deben tener prioridad diferente y de un valor entre 1 y 8. Mientras no se cumpla la condición anterior, el controlador de demanda no aceptará las prioridades asignadas.

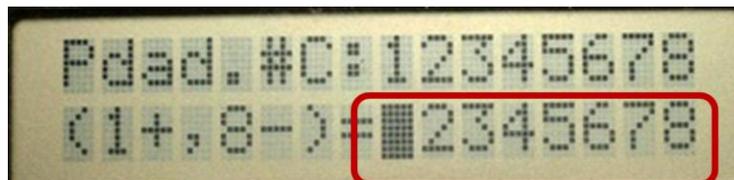


Figura 7-16. Asignación de prioridades a cada carga.

Las prioridades son utilizadas por el controlador de demanda en el momento de controlar su operación en función de la demanda. Cuando se requiere encender una carga, se hará con la carga apagada que tenga la mayor prioridad y cuando se requiera apagar, se apagará la carga encendida de menor prioridad.

7.8 Activación del control de las cargas por demanda (prioridad)

El controlador cuenta con la capacidad de controlar la operación de las ocho cargas en función de la demanda o en función de un horario establecido. Cuando se programan los eventos del control de las cargas es cuando se le indica al

controlador a través del parámetro P (prioridad) si se hará uso de la prioridad (demanda) para el control de la operación de la carga o no (por horario). Si se coloca que $P=S$, el control de la carga es función de la demanda y se hará uso de la prioridad y con $P=N$, el control de la carga es totalmente por horario y la prioridad aquí no tiene uso. En la Figura 7-17 se muestra la pantalla del controlador en donde al programar el evento se señala si la carga queda o no en función de la demanda.

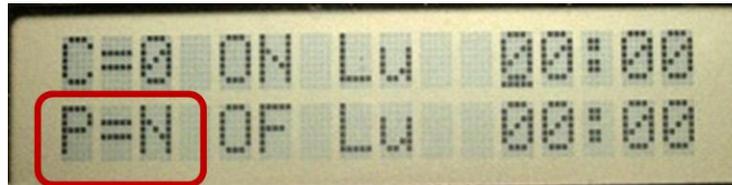


Figura 7-17. Activación del control por demanda (prioridad).

El controlador de demanda al operar en función de la demanda, está diseñado para que solo tome decisiones sobre el control de una sola carga cada minuto de acuerdo al algoritmo de control que más adelante se describirá.

7.9 Señal de alarma para detectar que la demanda pronosticada es mayor a la máxima

El controlador de demanda cuenta con una señal de salida que enciende un led cuando se detecta que la demanda pronosticada toma un valor mayor que la demanda máxima permitida. Esta señal se desactiva en el momento en que la demanda pronosticada nuevamente toma un valor menor a la demanda máxima. Esta señal que activa el led está disponible a través del conector J11 y puede ser utilizada para activar alguna otra tipo de alarma ya sea auditiva o visual. En la Figura 7-18 se muestra el circuito correspondiente a esta salida.

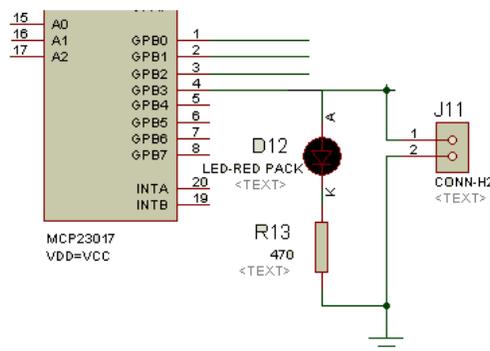


Figura 7-18. Señal de alarma si $D_{pro} > D_{max}$.

7.10 Programación del controlador a través de eventos

La programación del controlador de demanda se hace a través de hasta 16 eventos que pueden ser asignados a cualquier carga. Cada evento contiene a que carga es asignado (C), a partir de qué momento la carga se activa (ON) y en qué momento se desactiva (OFF) y si esta activación va a estar en función de la demanda (P=S) o solo es un control por horario (P=N). A cualquier carga le pueden ser asignados varios eventos en forma simultánea pero se deberá tener cuidado con su traslape de estos en el tiempo.

En la Figura 7-19 se presenta un ejemplo de una pantalla correspondiente a un evento. La información que contiene es: 1) Carga a controlar. 2) Tiempo de encendido. 3) Tiempo de apagado y 4) Control por prioridad.

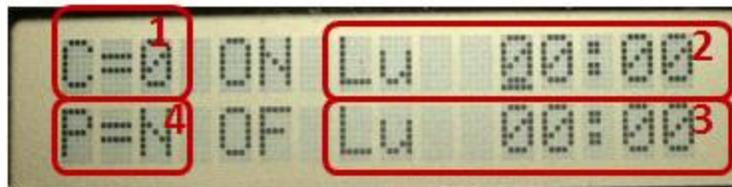


Figura 7-19. Información que contiene cada evento programado.

El objetivo de cada uno de estos parámetros se explica a continuación.

1) Carga que se controla:

Aquí se coloca el número de la carga a la que va dirigido el evento. Su valor va del 1 al 8.

2) y 3) Tiempo de activación/desactivación:

Indica el momento en que la carga se activa (ON) o se desactiva (OFF). Cada uno de ellos está compuesto de dos partes que son el día y la hora. Para el día se cuenta con las siguientes opciones: Lu, Ma, Mi, Ju, Vi, Sa, Do, LaV, SyD, LaL. El significado de las opciones que cubren varios días es: LaV equivale a seleccionar todos los días entre semana, SyD equivale a seleccionar sábado y domingo y LaL a seleccionar todos los días de la semana. Lo anterior fue para facilitar la programación múltiple, es decir que la carga se active o desactive en varios días de la semana utilizando para ello un solo evento y lo cual hace más eficiente el uso de los mismos. El formato de la hora de activación o desactivación es HH:MM, donde HH es la indica la hora (00-23) y MM indica los minutos (00-59)

4) Prioridad.

La prioridad (control por demanda) se activa haciendo P=S y queda desactivada con P=N.

Caso: P=S.

Al activar la prioridad, indica que el control del encendido y apagado de la carga es en función de la demanda existente. Si la carga está encendida cuando llega el tiempo de apagado (OFF), entonces la carga es apagada.

Caso: P=N.

Lo que se hace es que el encendido y apagado de la carga sea en función de un horario establecido e independiente de la demanda y prioridad existente. Cuando se alcanza el tiempo de encendido (HH:MM_{ON}) la carga se enciende independientemente de la demanda que exista. Cuando se alcanza el tiempo de apagado (HH:MM_{OFF}) la carga se apaga en forma independiente de la demanda que haya. Esta función lleva prioridad sobre el control por demanda en caso de que haya traslape en sus horarios.

7.11 Control manual de encendido y apagado de las cargas

El controlador de demanda cuenta con la función de el encendido de cualquiera de las ocho cargas en forma manual. Esto se controla en forma directa desde el teclado y lleva prioridad sobre el control por eventos.

Estando en la pantalla principal, basta con oprimir el número correspondiente a la carga deseada y aparecerá la pantalla, como lo muestra la Figura 7-21, que indica su estado en cuanto a automático o no y donde sus posibles valores son: ON, Auto y OFF.

El estado se cambia utilizando las flechas de izquierda y de derecha del teclado y para salir se oprime OK, como lo muestra la Figura 7-20.



Figura 7-20. Teclas de izquierda, derecha y OK.

Los estados posibles en el control manual son:

Automático: Aquí el encendido y apagado de la carga se controla totalmente por los eventos programados, ya sea que manejen o no prioridad, la pantalla debe verse como lo muestra la Figura 7-21.



Figura 7-21. Carga 5 en estado Automático.

Manual: En el mismo momento en que se cambia al estado ON, la carga correspondiente se enciende. La pantalla debe verse como lo muestra la Figura 7-22. La carga permanecerá encendida mientras se encuentre en este estado y se ignorarán todos los eventos que en este tiempo sucedan.



Figura 7-22. Carga 5 se encuentra encendida en forma manual.

En el momento en que se cambia a estado de OFF, la carga correspondiente se apaga. La pantalla debe verse como lo muestra la Figura 7-23. La carga permanecerá apagada mientras se encuentre en este estado y se ignorarán todos los eventos que en este tiempo sucedan.



Figura 7-23. Carga 5 se encuentra apagada en forma manual.

Al regresar al estado de automático se comenzará a operar en función de la que señalen los eventos asignados a la carga.

7.12 Encendido o apagado de todas las cargas en forma simultánea

Se agregaron tres señales de entrada al controlador de demanda para actuar en casos de emergencia y que se requiera que en forma simultánea se apaguen todas las cargas o bien que se enciendan todas ellas. El circuito se muestra en la Figura 7-24.

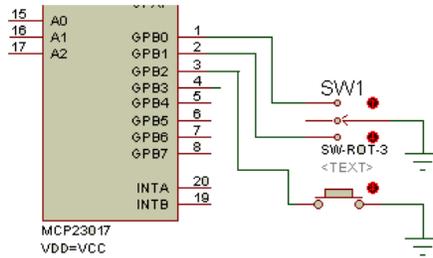


Figura 7-24. Control del encendido o apagado de todas las cargas.

Se tienen tres señales de entrada donde la primera enciende todas las cargas independientemente del estado o control que tengan, lo cual equivale que a través del teclado se hallan puesto cada una de las cargas en estado de “ON”. La segunda señal, apaga todas las cargas lo cual equivale que a través del teclado se hallan puesto cada una de las cargas en estado de “OFF”. Estas dos señales se controlan con un switch de un polo tres tiros para que solo una de ellas se active a la vez. La tercera señal de entrada, coloca a todas las cargas en “Auto”, lo que equivale a utilizar el teclado y colocar cada una de las cargas en estado de “Auto”.

7.13 Algoritmo de control para las cargas en función de la demanda

El algoritmo solo enciende o apaga una sola carga cada minuto cuando el controlador se encuentra en modo de control por demanda y que su horario de operación se encuentre activo, es decir, que el tiempo actual se encuentre dentro del rango del horario establecido en el evento correspondiente.

Para mayor facilidad en la implementación del algoritmo de control se lleva contabilidad de los pulsos que llegan al controlador y que vienen del medidor de energía sobre cada una de las tres subáreas que se presentan en la Figura 7-25, en lugar de manejar su energía correspondiente. Pul1, Pul2 y Pul3, son los pulsos que llegaron en cada una de las tres subáreas. Las dos primeras subáreas corresponden a los dos primeros subintervalos de 5 minutos de los tres que se requieren para el cálculo de la demanda. La tercera subárea corresponde al tiempo ya transcurrido del tercer subintervalo de 5 minutos. La cuarta subárea es la que se desconoce y por lo cual habrá que pronosticarla. La separación entre estas dos últimas subáreas la da el tiempo actual que se le llamará “ti”.

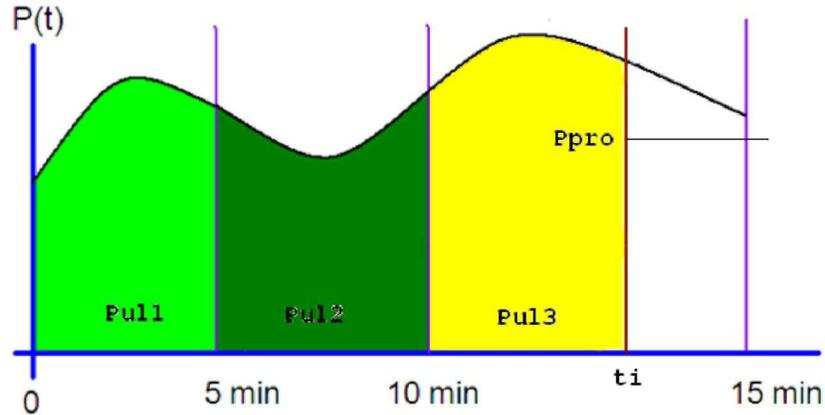


Figura 7-25. El controlador lleva contabilidad de los pulsos que han llegado en cada una de las tres subáreas de tiempo ya transcurridas.

La energía a que equivale cada pulso que llega está dada por la ecuación (7-10) donde K_a es la constante que indica los cientos de pulsos que genera el medidor de energía por cada kWh medido. Como todo está en segundos, se obtiene la energía en kW s a que equivale cada pulso que se registra del medidor de energía.

$$\text{Energía de 1 pulso} = \frac{1 \text{ kWh}}{100 * K_a} = \frac{1 \text{ kWh}}{100 * K_a} * \frac{3600 \text{ seg}}{h} = \frac{36 \text{ kW}s}{K_a} \quad (7-10)$$

Ya con la energía a que equivale cada pulso, los pulsos que llegaron en cada una de las primeras tres subáreas y conociendo la potencia pronosticada (P_{pro}), se obtiene la demanda pronosticada como lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} \text{Dempro(kW)} &= \frac{\text{Area total en kW}s}{900 \text{ seg}} \\ &= \frac{(\text{Pul1} + \text{Pul2} + \text{Pul3}) \frac{36 \text{ kW}s}{K_a} + P_{pro}(300 - ti) \text{ kW}s}{900 \text{ seg}} \end{aligned} \quad (7-11)$$

$$\text{Dempro(kW)} = \frac{(\text{Pul1} + \text{Pul2} + \text{Pul3}) 36 \text{ kW}s}{900} + P_{pro}(300 - ti) \quad (7-12)$$

Finalmente, la ecuación utilizada por el controlador para el cálculo de la demanda pronosticada (Dempro) en kW evaluada en el tiempo "ti" es la siguiente ecuación.

$$\text{Dempro(kW)} = \frac{(\text{Pul1} + \text{Pul2} + \text{Pul3})}{25 * K_a} + \frac{P_{pro}(300 - ti)}{900} \quad (7-13)$$

Otros parámetros requeridos por el algoritmo de control son la demanda máxima (Demmax) y la holgura, que fueron proporcionados por el usuario como ajustes iniciales del controlador.

Un nuevo parámetro para mejorar el control en función de la demanda es la potencia máxima que se puede permitir (Potmax) en la subárea faltante que va desde el tiempo t_i hasta completar el tercer subintervalo de 5 minutos, de tal forma que al completar el período total no sea rebasada la demanda máxima permisible. El valor de Potmax nos permite saber cuál es el límite máximo de potencia que puede se puede activar en tiempo t_i sin que el valor de la demanda máxima permisible sea rebasado al finalizar el intervalo de los 15 minutos. Este valor se obtiene en base a la ecuación (7-13) pero igualándola a la demanda máxima y sustituyendo la potencia pronosticada por la potencia máxima permitida como lo muestra la siguiente ecuación.

$$Demmax(kW) = \frac{(Pul1 + Pul2 + Pul3)}{25 * Ka} + \frac{Potmax(300 - ti)}{900} \quad (7-14)$$

Despejando la potencia máxima se obtiene lo siguiente.

$$Potmax(kW) = \left[100 * Demmax - \frac{4(Pul1 + Pul2 + Pul3)}{Ka} \right] \frac{9}{(300 - ti)} \quad (7-15)$$

También se utiliza otro parámetro que es la capacidad disponible (Cdisp), que representa la capacidad en kW que pueden activarse sin que se rebase el valor de la demanda máxima permisible habiéndole restado el valor de la holgura y el valor de la potencia que se pronosticada (Ppro). Lo anterior se describe en la siguiente ecuación.

$$Cdisp(kW) = Demmax - holgura - Ppro \quad (7-16)$$

El algoritmo de control en función de la demanda, el cual es exclusivo para las cargas que en la programación de los eventos fueron activadas con manejo por prioridad, se representa en la Figura 7-26. Este algoritmo solo se ejecuta cada cambio de minuto. Recordar que cada 15 segundos, la potencia pronosticada (Ppro) se actualiza.

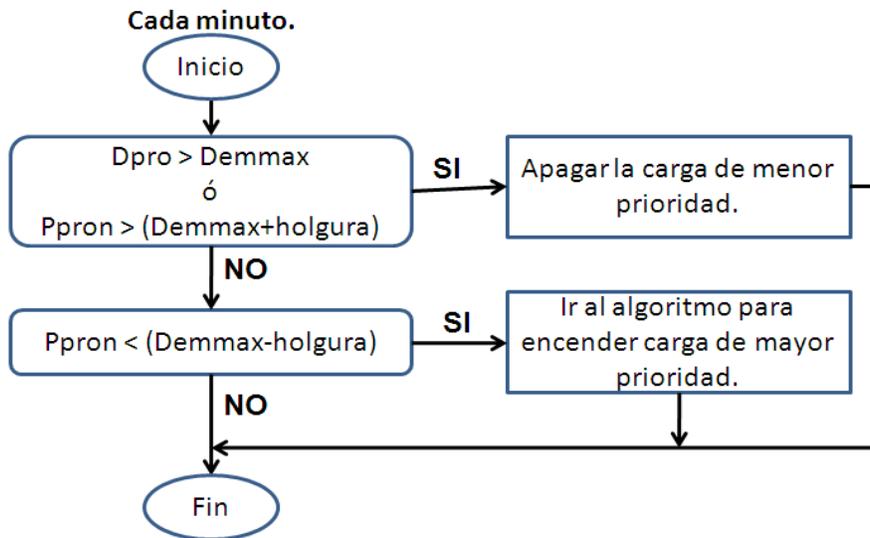


Figura 7-26. Algoritmo de control exclusivo para las cargas activadas en función de la demanda.

El objetivo es no permitir que la demanda pronosticada rebase la demanda permisible ni que la potencia pronosticada rebase el valor de la demanda permisible en un valor mayor a la holgura establecida. Recordar que el cambio en el valor de la demanda pronosticada es muy suave ya que viene de un promedio en un intervalo de 15 minutos y el cambio en el valor de la potencia pronosticada es mucho más rápido pero con cambios suaves (están en función del valor de alfa) que la potencia instantánea que se obtiene cada 15 segundos.

Si en este algoritmo hay necesidad de apagar una carga, simplemente se apaga la carga de menor prioridad de las que estén encendidas y que su operación esté en función de la demanda.

En el algoritmo anterior, si se llega al cuadro donde hay que encender la carga de mayor prioridad, habrá que ejecutar el algoritmo que se presenta en la Figura 7-27.

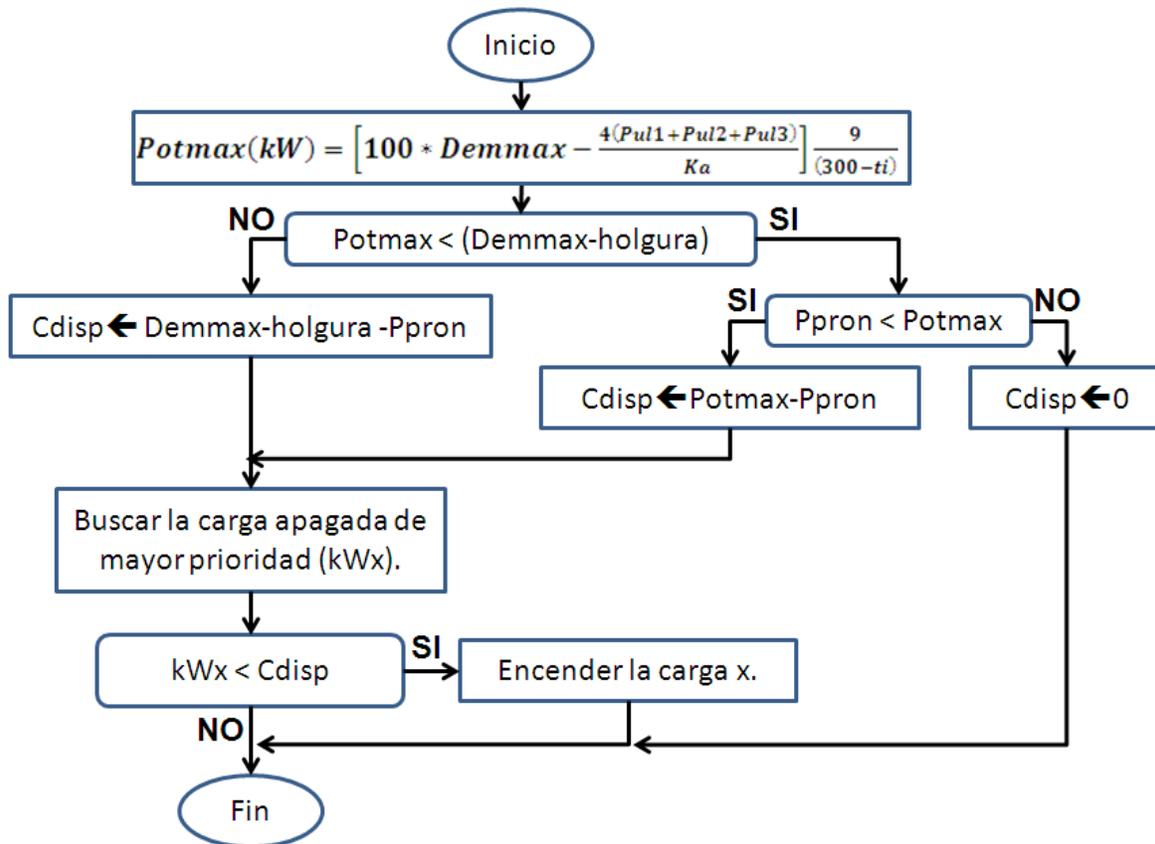


Figura 7-27. Algoritmo para encender una carga en función de la demanda.

En esta sección del algoritmo de control, lo primero que se hace es calcular la máxima potencia que se puede activar (Potmax) sin que la demanda permisible (Demmax) sea rebasada al término del tercer subintervalo de 5 minutos. Después en base a la relación entre los valores de Potmax, Demmax-holgura y Ppron (potencia que se pronostica que habrá), se obtiene la máxima potencia que se puede activar (Cdisp). Posteriormente se busca la carga apagada de mayor prioridad y si su potencia es menor que Cdisp, se procede a activarla, de otra forma no se activa ninguna carga.

Son tres situaciones diferentes las que se distinguen en este algoritmo. La primera se representa en la Figura 7-28, que es cuando Potmax es mayor que (Demmax-holgura). Al activar una carga se desea que la suma de las cargas activadas sea de un valor menor a (Demmax-holgura) para poder disminuir la probabilidad de rebasar la máxima potencia permisible. Por lo tanto en este caso la capacidad de potencia que se puede activar (Cdisp) es la diferencia entre (Demmax-holgura) y Ppron.

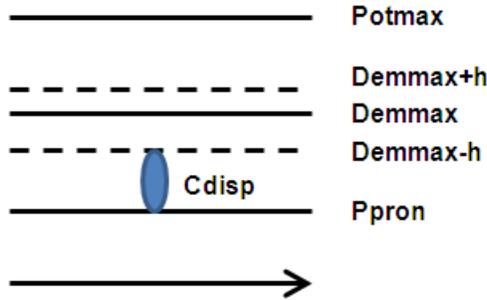


Figura 7-28. Caso en que $Potmax > (Demmax-h)$.

La segunda y tercera situación se obtienen cuando $Potmax$ da un valor menor a $(Demmax-holigura)$. $Potmax$, es un valor que no se debe rebasar. Si $Potmax$ es mayo que $Ppron$, existe una capacidad de potencia disponible y con valor de $Potmax - Ppron$, tal como lo muestra la Figura 7-29.

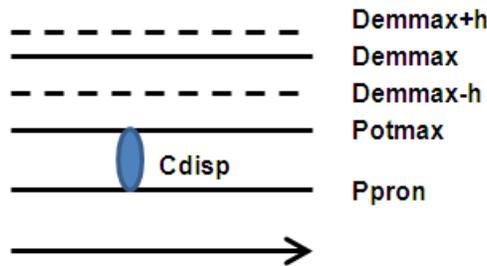


Figura 7-29. Caso en que $Potmax < (Demmax-h)$ y además $Potmax > Ppron$.

La tercera y última situación se genera cuando $Potmax$ es menor que $Ppron$ como lo muestra la Figura 7-30. En este caso la capacidad disponible es cero por lo que no es posible activar carga alguna.

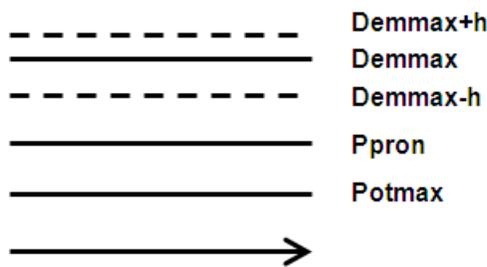


Figura 7-30. Caso en que $Potmax < Ppron$.

7.14 Detalles de los diferentes modos de operación de control de cargas

Aquí se detalla la operación del controlador de demanda y de lo que sucede ante un traslape de un control por demanda con un control por horario. Lo anterior puede surgir ya que intencionalmente se puede hacer que exista el traslape a través de dos eventos para una misma carga en donde uno active el control por demanda y el otro se active el control por horario. A continuación se explica la forma como se lleva el control en las diferentes situaciones que hay.

7.14.1 Control por prioridad de la carga “i”

El evento asignado a la carga “i” que activa el estado de prioridad contiene el tiempo de inicio $tp_{ON}(i)$ y el tiempo de terminación $tp_{OFF}(i)$. Dentro de este tiempo la carga se prende o se apaga en función de la variación de la demanda pronosticada con el algoritmo que ya fue explicado. Si al llegar a tiempo $tp_{OFF}(i)$ la carga se encuentra encendida se apagará. El controlador maneja una señal P que vale 1 cuando la carga se encuentra en zona de activación por prioridad. Cada carga tiene su propia señal de P. En la Figura 7-31 se muestra en modo gráfico este tipo de control.



Figura 7-31. Control por prioridad.

7.14.2 Control por horario de la carga “i”

El evento asignado a la carga “i” que activa el control por horario contiene el tiempo de inicio $tt_{ON}(i)$ y el tiempo de terminación $tt_{OFF}(i)$. En el tiempo de inicio se enciende la carga si es que estaba apagada y en el tiempo de apagado se apaga la carga si es que estaba encendida. Recordar que la carga también se puede prender y apagar manualmente. El controlador maneja una señal T que vale 1 cuando la carga se encuentra en zona de activación por tiempo (horario). Cada carga tiene su señal de T. En la Figura 7-32 se muestra en forma gráfica este tipo de control.



Figura 7-32. Control por horario.

7.14.3 Dentro de la zona activada por prioridad se activa una zona activada por horario

Un ejemplo de aplicación de este caso sería que se defina de 8am a 8pm como zona de prioridad pero se desea que la carga se encuentre encendida de 2pm a 4pm. Lo que sucede aquí es que al llegar el tiempo de encendido por horario $tt_{ON}(i)$ la carga se enciende si es que estaba apagada. Al llegar el tiempo de apagado por horario $tt_{OFF}(i)$ la carga se apaga quedando ahora el control sujeto a la demanda. En la Figura 7-33 se muestra en forma gráfica la operación.



Figura 7-33. Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma total.

7.14.4 Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma parcial

Aquí, al llegar el tiempo de encendido por horario $tt_{ON}(i)$ la carga se enciende si es que estaba apagada. Si llega el final de control por prioridad, simplemente se ignora ya que el control por horario lleva prioridad. Al llegar el tiempo de apagado por horario $tt_{OFF}(i)$ la carga se apaga. La Figura 7-34 se muestra en forma gráfica la operación.

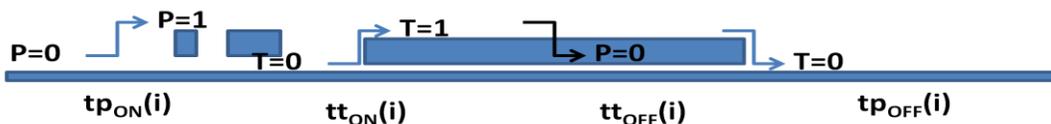


Figura 7-34. Zona por horario dentro de una zona por prioridad en forma parcial.

7.14.5 Zona de prioridad dentro de una zona de por horario

En esta situación realmente no le sucede nada a la carga correspondiente ya permanece encendida siempre porque el control por horario lleva prioridad sobre el control por demanda. Este tipo de situación debe evitarse ya que solo desperdicia el evento que definió la zona de prioridad. La Figura 7-35 muestra en forma gráfica esta operación.

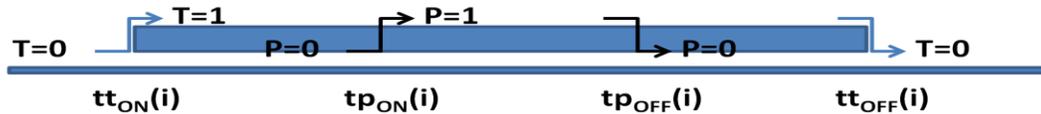


Figura 7-35. Zona de prioridad dentro de una zona de por horario.

7.14.6 Traslape del control manual con el control por demanda o por horario

Aparte de los controles de cargas como son el que maneja prioridad y el que lo hace por horario, también se pueden encender y apagar las cargas en forma manual. Este traslape es el que se describe aquí.

A cada una de las cargas se le puede asignar en forma manual cada uno de los siguientes tres posibles estados: ON/OFF/AUTO. En el estado ON la carga permanece encendida. En el estado OFF la carga permanece apagada. En el estado AUTO la carga dependerá totalmente del control por eventos y que pueden ser en función de la demanda o en función de un horario. Estos tres estados se controlan directamente en el teclado o bien en forma grupal por las señales de control ya descritas. En la Figura 7-36 se muestran en forma gráfica los tres estados. ON/OFF indica que la carga puede estar prendida o apagada.



Figura 7-36. Estados posibles de las cargas: ON, OFF o Auto.

Mientras una carga se encuentre en los estados ON u OFF, los eventos que son ejecutados y que tienen que ver con el control por prioridad, no alteran el estado de la carga pero sí el valor de P cuyo valor es P=1 si está activando el control por prioridad o viceversa. Por lo anterior, al salir de los estados de ON u OFF, si P=1, el estado de la carga correspondiente comienza a estar en función de la demanda pronosticada. En la Figura 7-37 se presenta esta operación en forma gráfica.

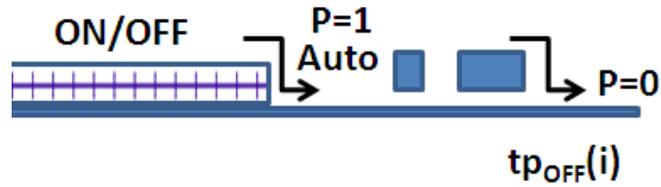


Figura 7-37. Paso de los estados ON/OFF al estado Auto. Caso de P.

Si hay eventos que son ejecutados y que tienen que ver con el control de cargas por horario dentro del tiempo en que la carga se encuentra en los estados ON u OFF, no alteran el estado de la carga pero sí se permite que el valor de T se haga cero pero no de que tome el valor de uno. Lo anterior evita que se prenda cargas cuando no es posible hacerlo. Puede ser posible salir de los estados ON/OFF con la carga apagada y el valor de T=1 pero esto no hace que la carga se encienda. En la Figura 7-38 se describe la operación en forma gráfica.

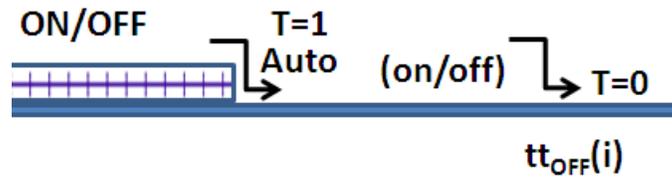


Figura 7-38. Paso de los estados ON/OFF al estado Auto. Caso de T.

8 Programación y comunicación del controlador de demanda con la computadora

El controlador permite la comunicación con una la computadora personal (PC) para poder transferir varios tipos de información. La comunicación se realiza a través del puerto serial utilizando la interfaz RS232. Se pueden realizar dos tipos de transferencia de información: a) La programación de los eventos. Aquí la comunicación se puede realizar en ambas direcciones, es decir, tanto se pueden transferir los eventos programados en el PC hacia el controlador de demanda, como los eventos programados en el controlador transferirlos hacia el PC. b) Transferencia de información de las potencias y demandas recopiladas por el controlador de demanda durante su operación. Esta transferencia se hace del controlador al PC para posteriormente ser graficada y permitir su análisis.

8.1 Programación de los eventos

Los eventos que controlan la operación del controlador de demanda se pueden realizar de dos formas: a) Hacer la programación de los eventos directamente desde el teclado del controlador. b) Realizar la programación de los eventos en forma más amigable en la computadora desde la interface desarrollada en Excel para posteriormente transferir esta programación al controlador. La programación de los eventos solo cubre un período de una semana el cual es cíclico, es decir, se puede repetir indefinidamente.

La forma de programación en el controlador se explica en el manual de operación del controlador de demanda, por lo que se procederá solo a explicar la programación utilizando el software que para ello fue creado.

8.2 Pantalla de captura de eventos

El controlador fue diseñado para programarle hasta 16 eventos de control aunque fácilmente se puede incrementar a cualquier cantidad requerida. En la computadora se pueden programan estos 16 eventos de una manera mucho más amigable e inclusive presentar los resultados de una forma gráfica. Un ejemplo de cómo queda esta programación de los 16 eventos se aprecia en la Figura 8-1. Cabe aclarar que el evento que tenga como carga asignada un cero, es un evento

que no está siendo utilizado. En el ejemplo dado, los eventos 14, 15 y 16 no están siendo utilizados.

Eventos para control de las cargas:

	Carga Asignada	Manejar Prioridad:	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
			Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Lu	8	30	Lu	10	35
2	1	Si	Mi	10	15	Ju	15	30
3	1	No	Sa y Do	8	30	Sa y Do	10	30
4	2	Si	Lu a Vi	9	15	Lu a Vi	18	30
5	2	No	Lu a Vi	13	15	Lu a Vi	15	10
6	2	Si	Diario	20	30	Diario	22	15
7	3	No	Lu a Vi	10	35	Lu a Vi	15	45
8	3	No	Sa y Do	11	15	Sa y Do	15	30
9	4	Si	Lu	8	30	Vi	20	30
10	5	Si	Sa	8	0	Do	20	37
11	5	Si	Mi	20	30	Ju	8	35
12	6	Si	Diario	8	15	Diario	20	15
13	6	No	Diario	14	30	Diario	15	30
14	0	No	Diario	3	3	Diario	3	3
15	0	Si	Diario	4	4	Diario	4	4
16	0	Si	Diario	5	5	Diario	5	5

Figura 8-1. Ejemplo de una programación de eventos en la PC.

Solo como comparación, en la Figura 8-2, se presenta la pantalla de captura que se utiliza en el controlador de demanda para cada evento que se desea programar. Se observa en ella, la misma cantidad de información que hay en cada uno de los 16 eventos mostrados en la figura anterior, con la desventaja de no poderla compararla en forma simultánea con el resto de eventos ni observar su relación en forma gráfica y en el eje del tiempo.

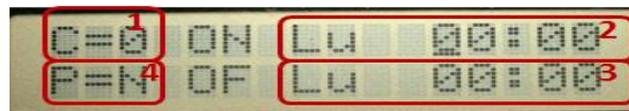


Figura 8-2. Información de un evento vista en el controlador.

Para capturar en la computadora los eventos, lo primero que hay que hacer es ejecutar el programa en Excel llamado eventos.xls. Lo primero que aparece es la pantalla de la Figura 8-1. En esta pantalla se empieza por programar los eventos que sean necesarios y con la información correspondiente.

Parámetros de cada uno de los eventos:

La Figura 8-3 muestra los parámetros relacionados con los dos eventos que fueron asignados a la carga uno y en la Figura 8-4 se muestran los tres eventos asignados a la carga 2.

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos:	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Lu	8	30	Lu	10	35
2	1	Si	Mi	10	15	Ju	15	30

Figura 8-3. Ejemplo de programación de eventos para la carga 1.

4	2	Si	Lu a Vi	9	15	Lu a Vi	18	30
5	2	No	Lu a Vi	13	15	Lu a Vi	15	10
6	2	Si	Diario	20	30	Diario	22	15

Figura 8-4. Ejemplo de programación de eventos para la carga 2.

A continuación se describe cada uno de los parámetros utilizados en la programación de los eventos.

Carga asignada: Aquí se selecciona el número de la carga (1,2,...,8) a la cual va dirigido el evento a programar como lo muestra la Figura 8-5. Se pueden asignar varios eventos a una misma carga simplemente repitiendo el número de la carga en la programación de otro evento. Colocar un cero es equivalente a decir que ese evento no se utiliza y por lo cual el resto de su información se ignora. El valor se puede asignar directamente con el teclado o bien se selecciona una de las opciones que se presentan.

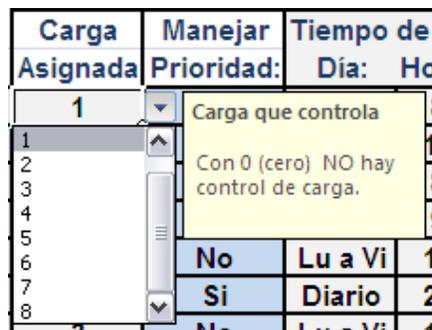


Figura 8-5. Selección de la carga asignada en un evento.

Manejo de prioridad: En la Figura 8-6 se presentan las dos opciones que son SI y NO. Con la opción SI, se indicará que a partir del tiempo de encendido el control de operación de la carga es totalmente en función de la demanda. Al llegar el tiempo de pagado, si la carga estaba encendida se apaga y se deja de controlar. Si la opción seleccionada es NO, indicará que la carga se controla por horario y se encenderá si es que estaba apagada cuando llegue el tiempo de encendido y se apagará, si es que estaba encendida, cuando se llegue el tiempo de apagado.

Manejar		Tiempo de encendido.		
Prioridad:		Día:	Hora:	Minutos
No	▼			
No				
Si				
No	▼			
Si				
No				
Si				

Manejo de Prioridad:

No : Prende y se apaga a la hora señalada.

Si : Prende y apaga sujeto al controlador de cargas.

Figura 8-6. Selección de encendido de la carga por prioridad (SI) o por horario (NO).

Días de encendido: Aquí se señala el día o días en que se encenderá la carga como lo muestra la Figura 8-7. Para facilitar la programación del controlador que solo abarca un período de una semana, se dieron las siguientes opciones: a) Para un solo día se utiliza: Lu, Ma, Mi, Ju, Vi, Sa y Do. b) Para varios días se puede utilizar: Lu a Vi que equivale a decir que la carga se encenderá todos los días entre semana (Lu, Ma, Mi, Ju, Vi) al llegar la hora de encendido. Sa y Do indica que se enciende solo los días de fin de semana (Sa, Do) y finalmente Lu a Vi que equivale a decir que las carga se encenderá todos los días de la semana (Lu, Ma, Mi, Ju, Vi, Sa, Do). Recordar que se pueden asignar varios eventos a una misma carga para dar más versatilidad al control de la misma.

Tiempo de encendido.		
Día:	Hora:	Minutos
Lu	8	30
Ma	10	15
Mi	8	30
Ju	9	15
Vi	13	15
Sa	20	30
Do		
Lu a Vi		

Figura 8-7. Selección de la fecha de encendido.

Tiempo de encendido: Aquí se señala la hora y los minutos en que se desea que la carga a controlar entre en operación ya sea con prioridad o por horario como lo muestra la Figura 8-8. La hora se maneja en formato de 0 a 23 horas. Esta hora se hace válida siempre y cuando se encuentre en uno de los días señalado para el encendido.

Tiempo de encendido.		
Día:	Hora:	Minutos
Lu	8	30
Mi	16	15
Sa y D	17	30
Lu a V	18	15
Lu a V	19	15
Diario	20	30

Tiempo de encendido.		
Día:	Hora:	Minutos
Lu	8	30
Mi	10	52
Sa y Do	8	53
Lu a Vi	9	54
Lu a Vi	13	55
Diario	20	56

Figura 8-8. Selección del tiempo de encendido.

Días de apagado y tiempo de apagado: Se sigue la misma lógica y formato que la fecha y tiempo de encendido, solo que aquí se apaga la carga si es que estaba encendida al llegar este tiempo de apagado.

8.3 Graficador en el tiempo de los eventos programados

Se agregó un graficador al programa para facilitar la visualización de los eventos y su comparación en el eje del tiempo. Si se realizan cambios en cualquiera de los parámetros de un evento, habrá necesidad de oprimir nuevamente el botón de “Actualizar Gráfica” que se muestra en la Figura 8-9, para que ese cambio sea actualizado en la gráfica.

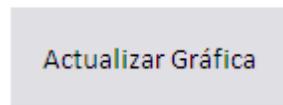


Figura 8-9. Botón de actualización de los eventos sobre la gráfica.

Los eventos se separaron en dos gráficas, una para los eventos que son en función del horario (Prioridad=NO) y otra para los eventos que son función de la demanda, es decir, manejan prioridad (Prioridad=SI). Esto para permitir una mejor visualización de lo que sucede en cada uno de los dos casos. La resolución del tiempo en la gráfica es de 5 minutos aunque la programación en los eventos es a nivel de minutos.

Como ejemplo se programaron tres eventos como lo muestra la Figura 8-10, los cuales fueron asignados a tres cargas diferentes y de los cuales dos son de control por horario (NO) y otro con control por prioridad (SI) que indica que su encendido/apagado es en función de la demanda.

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Diario	0	10	Diario	0	50
2	2	Si	Lu a Vi	0	30	Lu a Vi	1	10
3	3	No	Lu	0	10	Ma	0	30

Figura 8-10. Programación de tres eventos sobre tres cargas diferentes.

En la Figura 8-11 se muestra el resultado gráfico de la programación de los eventos anteriores. La grafica se realiza en forma vertical y cada carga tiene asignado un color y están colocadas de izquierda a derecha iniciando con la carga uno. En la primera gráfica se presentan los eventos de las cargas uno y tres ya que son sin prioridad. Como la carga dos utiliza la opción de prioridad, su gráfica se realizó en la parte derecha. Igualmente se escogieron tiempos pequeños para visualizar en forma total su gráfica. Para la carga tres, se realizó una programación por horario que inicia el día lunes y termina al día siguiente. Debido al corte que se hizo a la gráfica solo se aprecia el inicio y la terminación de la misma.

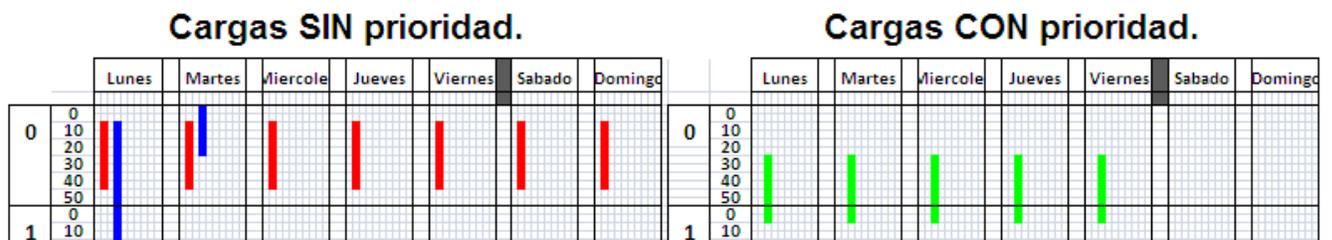


Figura 8-11. Ejemplo de gráficas de la programación de los eventos.

En la Figura 8-12 se presentan los mismos eventos anteriores con la diferencia de que al evento 2 se le quitó la prioridad.

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Diario	0	10	Diario	0	50
2	3	No	Lu a Vi	0	30	Lu a Vi	1	10
3	2	No	Lu	0	10	Ma	0	30

Figura 8-12. Programación de tres eventos sobre tres cargas diferentes.

En la Figura 8-13 se muestra la gráfica resultante. El objetivo es presentar varias cargas sobre una misma gráfica y resaltar la forma como son graficadas y la comparación de la programación de las mismas con el uso de colores diferentes. Como no hay carga con control por prioridad, la gráfica del lado derecho aparece vacía.

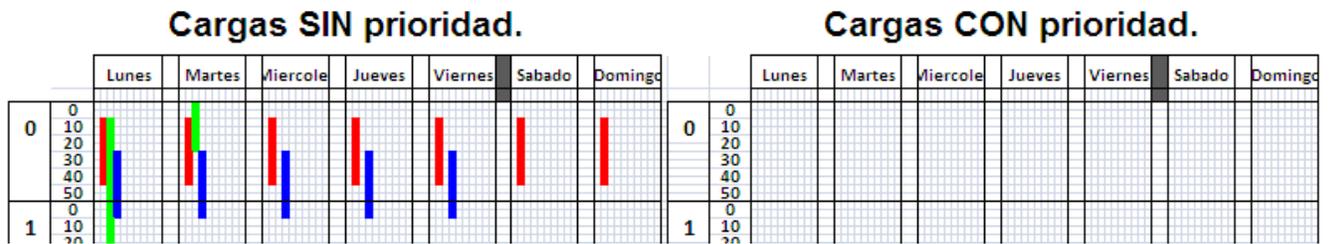


Figura 8-13. Gráficas de la programación de los eventos.

8.4 Transmisión de los eventos entre el controlador de demanda y el PC

Una vez que se ha realizado la programación de los eventos en el PC y después de haber realizado la comprobación de los mismos en forma gráfica, será necesario realizar su transmisión al controlador de demanda. Para ello se tienen en el PC los botones que se muestran en la Figura 8-4. La transmisión de eventos se puede realizar del controlador de demanda al PC o viceversa.



Figura 8-14. Botones de control para la comunicación con el controlador.

Para poder transmitir los eventos entre el controlador de demanda y el PC, primero se deberá colocar el controlador en la pantalla que se muestra en la Figura 8-15. En el manual de operación del controlador de demanda se explica cómo llegar a esta pantalla. Aquí el controlador queda en espera ya sea para transmitir los eventos que en él residen o bien recibir la información de los nuevos eventos desde el PC.

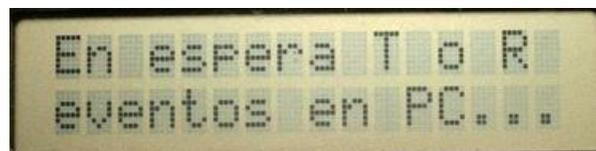


Figura 8-15. Pantalla de modo de comunicación.

La operación de los dos botones es la siguiente:

Botón de “Transmitir eventos”: Cada vez que se oprime este botón, se transmite la información de los eventos del PC al controlador, esto, siempre y cuando el controlador se encuentre en la pantalla de modo de comunicación. El controlador, una vez que recibe toda la información sale del estado de espera en que se encontraba y continúa su operación.

Botón de “Recibir Eventos”: Cada vez que se oprime este botón, el controlador de demanda transmite al PC toda la información de los eventos que tiene almacenados. Para ello es necesario que el controlador se encuentre en la pantalla de modo de comunicación. Una vez que el controlador envía toda la información sale de su estado de espera y continúa su operación.

8.5 Información recopilada durante el control de demanda

El controlador de demanda va almacenando información mientras realiza el control de las cargas. La información que recopila es la siguiente: a) Demanda pronosticada (Dpro), b) estado de cada una de las cargas (Expsal), c) Máxima demanda registrada (Dmaxreg) y d) El cambio de hora, almacenando solo la hora y número de día.

La información es almacenada en una memoria del tipo no volátil (no se pierde la información al desconectar el equipo) de capacidad de medio megabyte la cual se utilizará para guardar los datos recopilados durante los últimos 10 días de operación. Recordar que el controlador es programable en ciclos con duración de una semana por lo que con los diez días alcanza a cubrir todo un período del control programado.

A continuación se describe la forma como la información se va almacenando en la memoria. El controlador cada minuto, basado en la demanda pronosticada (Dpro) y el algoritmo de control presentado en la Figura 8-16(A), realiza el control de las ocho cargas. Por ello, cada minuto se procede a guardar en memoria el valor de la demanda pronosticada y el estado de cada una de las cargas (Expsal) como lo muestra la Figura 8-16(B). Para estos dos valores solo se requiere de un byte de información, ya que Dpro se redondea a kW y su valor máximo debe ser menor a 100 kW que es lo que maneja la tarifa OM de CFE. Para las ocho cargas, como su estado es binario (ON/OFF), se utiliza solo un byte de información, ya que se asigna un bit a cada una de las cargas. Por ejemplo, si solo las cargas 1,2,3 y 4 están encendidas se almacena un 15, y si solo las cargas 5,6,7 y 8 están encendidas se almacena un 240, y si todas las cargas están encendidas se almacena un 255.

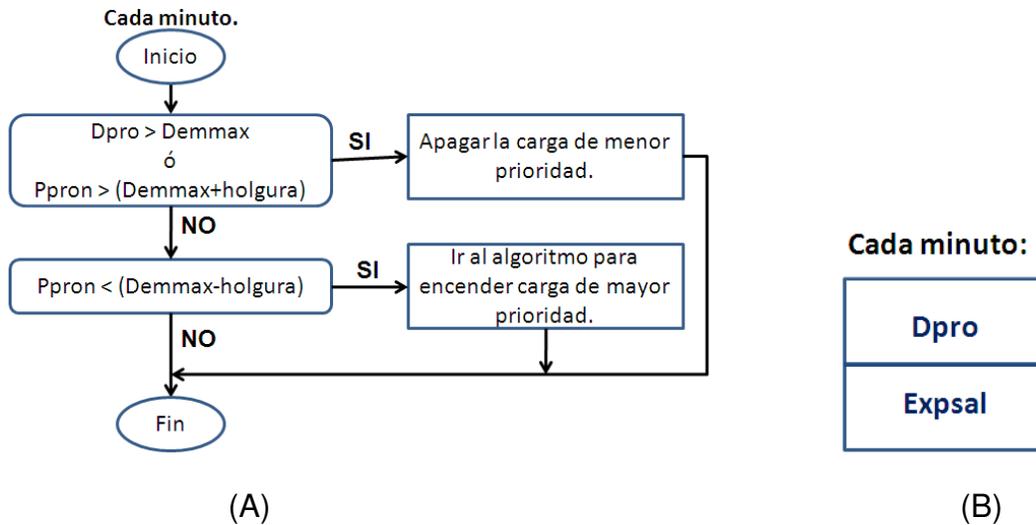


Figura 8-16. Información que se almacena en memoria cada minuto.

Cada 5 minutos la demanda pronosticada (Dpro), refleja la demanda real que se obtuvo en el intervalo de los últimos 15 minutos. Este valor es comparado con el valor máximo registrado que se ha tenido desde la última vez que se inicializó el controlador y cuyo valor es guardado en la variable Dmaxreg, ver la Figura 8-17(A). Este valor de Dmaxreg, es almacenado cada 5 minutos en la memoria ya que en este tiempo es cuando su valor es posible que cambie.

Como la información se va almacenando en direcciones consecutivas de memoria se decidió anteceder esta información por dos valores igual a 240, ver la Figura 8-17(B). Esto permitirá que al transmitir la información en forma serial al computador, se distinga entre los diferentes tipos de datos. No se utilizan contadores ya que el controlador puede ser activado en cualquier momento o bien solicitar también en cualquier momento la transmisión de la información.

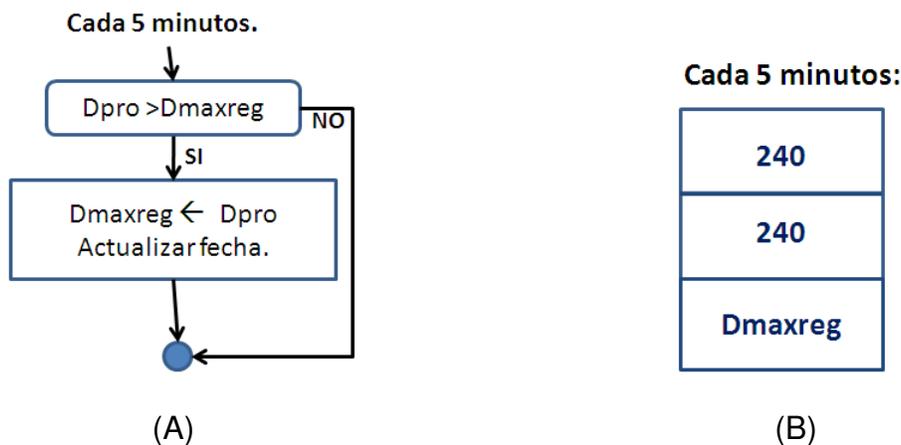


Figura 8-17. . Información que se almacena en memoria cada 5 minutos.

Para poder evaluar el comportamiento del control de la demanda y poder observar el momento exacto en que suceden las acciones tomadas, es necesario señalar el tiempo. Se decidió solo anexar el tiempo cada cambio de hora, el cual servirá como referencia en la gráfica para analizar lo que sucede en cada minuto dentro de ese tiempo. Como se almacena información de los últimos 10 días es necesario también agregar el día para distinguir lo que sucede en cada uno de ellos. Por esto, cada hora se almacena en memoria la hora y el número de día. Esta información se antecede por dos cantidades de valor de 250, como lo muestra la Figura 8-18. Esto para distinguir su valor entre la demanda máxima registrada, la demanda pronosticada y el estado de las cargas. También se agregó que cada vez que se inicializa (“reset”) el controlador, la demanda pronosticada y la demanda máxima se inicializan en cero, además se almacena en memoria la información 250/250/minutos/00 para que se visualice en la gráfica el momento en que se inicializó el controlador de demanda.

Cada hora:

250
250
Hora
NumDia

Figura 8-18. . Información que se almacena en memoria cada hora.

El almacenamiento de la información en la memoria se va realizando en forma circular como lo muestra la Figura 8-19. Esto significa que cada byte que se almacena en memoria, se guarda en la dirección siguiente del byte almacenado anteriormente y que al llegar al límite superior, que en este caso está dado por la dirección en memoria DmemMax, se inicia nuevamente en la dirección cero. Esto permite que automáticamente solo se esté almacenando la información correspondiente a los últimos 10 días de operación. Se tomaron 10 días de almacenamiento porque cubre el ciclo de operación del controlador que es de una semana.

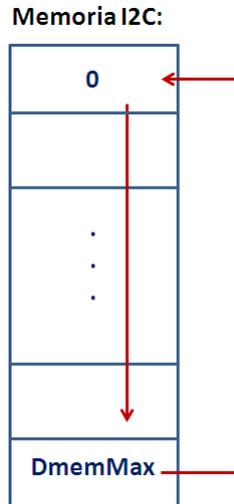
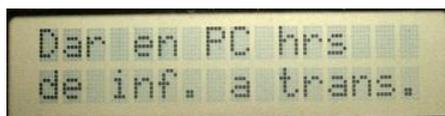


Figura 8-19. Manejo de la memoria en el almacenamiento de información.

8.6 Transmisión de la información recopilada al computador

Para transmitir la información recopilada al computador, se diseñó un programa en Excel. Este programa permite además de generar las gráficas de la información recopilada, facilitar el análisis de la operación de control.

Para transmitir la información recopilada por el controlador de demanda al computador, es necesario primero hacer la conexión serial entre ambos dispositivos. Después se deberá colocar el controlador en el estado de la pantalla que muestra la Figura 8-20(A) de acuerdo al manual de operación del controlador. En el computador se deberá ejecutar el programa “CapturaInformación.xls”. Una vez realizado la anterior, en el computador se deberá oprimir la tecla de “Leer datos”, como lo muestra la Figura 8-20(B).



(A)



(B)

Figura 8-20. Controles que permiten la transmisión de la información recopilada.

Al realizar lo anterior, se pedirá proporcionar la cantidad de horas de información que se desean transmitir como lo muestra la Figura 8-21 y que debe de ser un

valor menor o igual a 255 horas, que es lo que equivale a un poco más de 10 días y es lo máximo de horas que es posible almacenar.

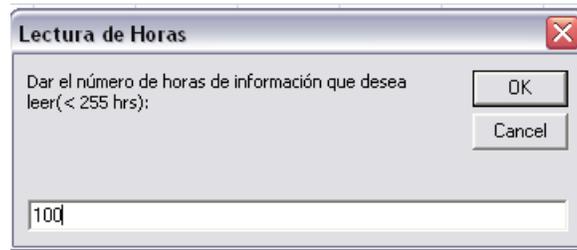


Figura 8-21. Pantalla donde se solicita las horas de información a leer en el controlador.

Toda la información solicitada será transmitida del controlador de demanda al computador. En el computador se quitan los bytes extra de control que fueron agregados por el controlador y se generan las gráficas de la demanda pronosticada y de la demanda máxima como se observa en la Figura 8-22.

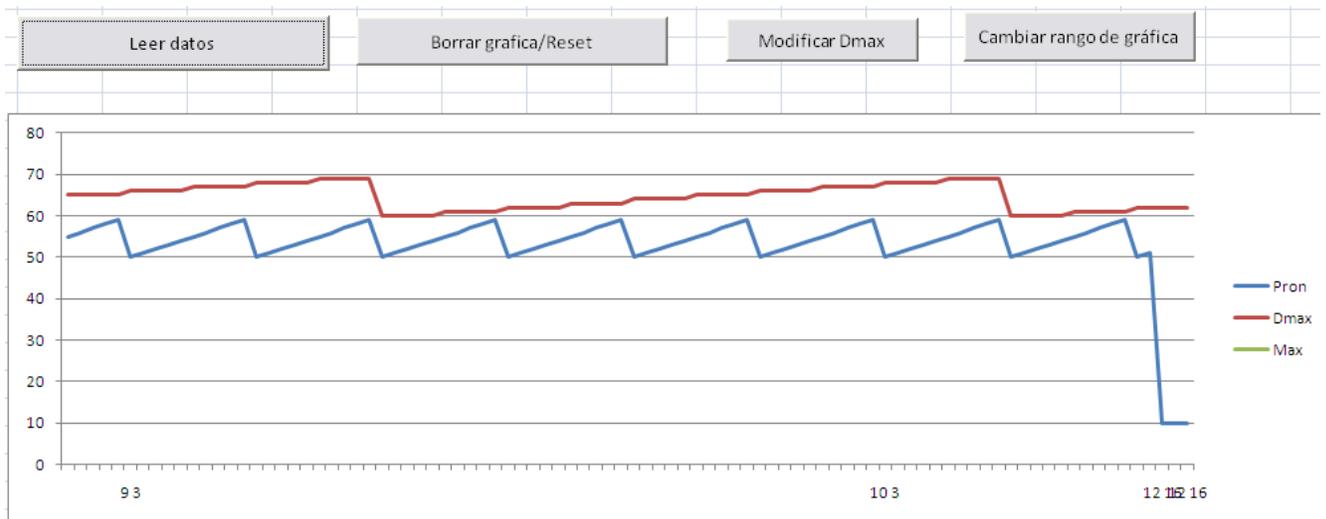


Figura 8-22. Gráfica de la demanda pronosticada y de la demanda máxima.

En la parte superior de las gráficas se anexaron los tres comandos mostrados en la Figura 8-23, los cuales permiten borrar las gráficas, modificar el valor de la demanda máxima y cambiar el rango de los datos representados en la gráfica. Este último permite realizar acercamientos en la zona deseada para un estudio más detallado de las demandas almacenadas o del control de las cargas.



Figura 8-23. Otros comandos de control del programa que captura la información.

También son generadas las gráficas que indican el estado de cada una de las cargas donde se señala en el tiempo, a una resolución de máxima de un minuto, si las cargas se encuentran encendidas (zona oscura) o apagadas (zona blanca) como lo muestra la Figura 8-24.

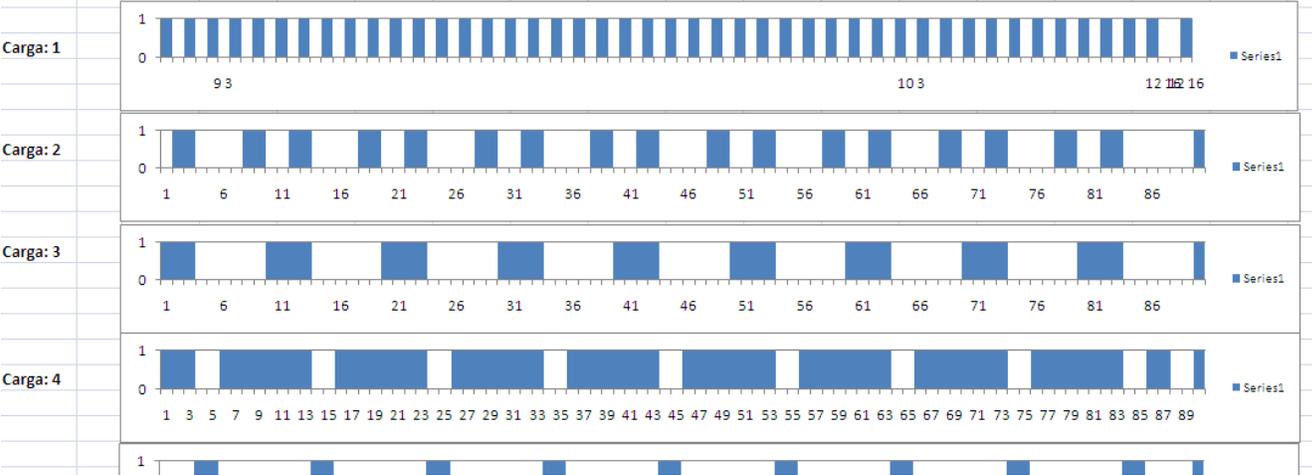


Figura 8-24. Gráficas del estado de cada una de las cargas.

8.7 Generación de las gráficas en Excel

En la Figura 8-25 se presenta como ejemplo, una parte de la información que se transmite del controlador de demanda al computador cuando esta es solicitada. Se observa los separadores de información por minuto (240,240) y por cada cinco minutos (250,250). Se repiten dos veces para distinguirla de la información que proporcionan las cargas ya que estas pueden generar cualquier valor entre 0 y 255.

255
240
240
32
22
255
32
255
32
255
33
255
32
255
240
240
32
33
255
37
255
37
255
37
255
37

Figura 8-25. Información que se recibe del controlador de demanda.

Una vez que la información es cargada a la página de Excel, es procesada para eliminar los datos de control y posteriormente generar una tabla en el tiempo como la mostrada en la Figura 8-26, donde se generan las tres columnas que son: a) Demanda pronosticada. b) La demanda máxima registrada y c) Las cargas encendidas en forma de número decimal.

pro	max	exp
22	32	255
32	32	255
32	32	255
33	32	255
32	32	255
33	32	255
37	32	255
37	32	255
37	32	255
37	32	255
37	32	255
37	32	255
38	32	255
37	32	255
38	32	254
38	32	0
38	32	1
9	32	2
12	32	2
13	32	2
12	32	4
13	32	4
24	32	4
24	32	8
24	32	8

Figura 8-26. Información ya procesada y lista para ser graficada.

Con las dos primeras columnas se genera la gráfica en el tiempo de la variación de la demanda pronosticada y de la demanda máxima registrada como lo muestra la Figura 8-27.

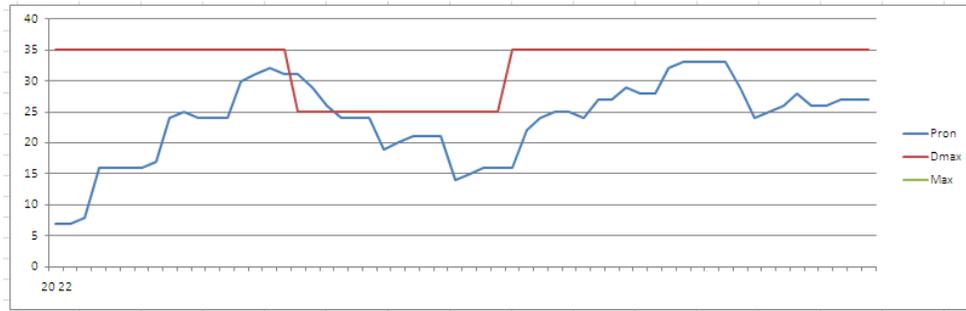


Figura 8-27. Gráfica en el tiempo de la demanda máxima y de la demanda pronosticada.

Con los datos de la columna tres, que están en forma decimal, se pasan a binario (8 bits) y se distribuyen en cargas individuales para generar en forma gráfica el estado de cada una de las cargas como lo muestra la Figura 8-28. Se generan ocho gráficas, una para cada una de las cargas. Si la zona se encuentra sombreada, significa que la carga está encendida en ese momento, de otra forma la carga se encuentra apagada.

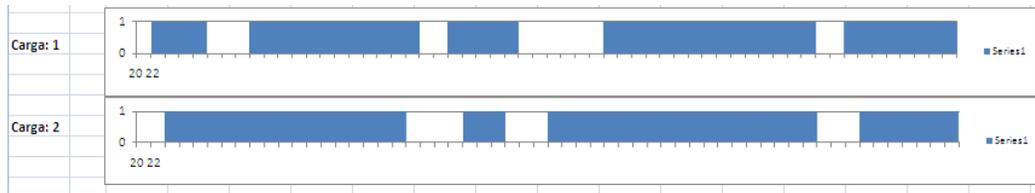


Figura 8-28. La gráfica que muestra los intervalos de tiempo en que cada una de las cargas opera.

9 Análisis y resultados

9.1 Análisis del efecto de no contar con la señal de fin de subintervalo de cada 5 minutos del medidor de CFE

Una de las preocupaciones que se tenía al inicio es que el controlador no está sincronizado al medidor de CFE para obtener el momento preciso en que se cumplen los cinco minutos para el cálculo de la demanda y que esto fuera a provocar diferencias considerables entre la demanda máxima medida por CFE y la demanda máxima medida por el controlador de demanda. El estudio de estas diferencias se hizo a través del análisis en el consumo de energía en diferentes días en una misma empresa.

Primero se obtuvo el consumo de potencia durante varios días realizando el muestreo de la potencia consumida en kW cada 15 segundos. En la Figura 9-1 se muestra un ejemplo de una de estas gráficas.

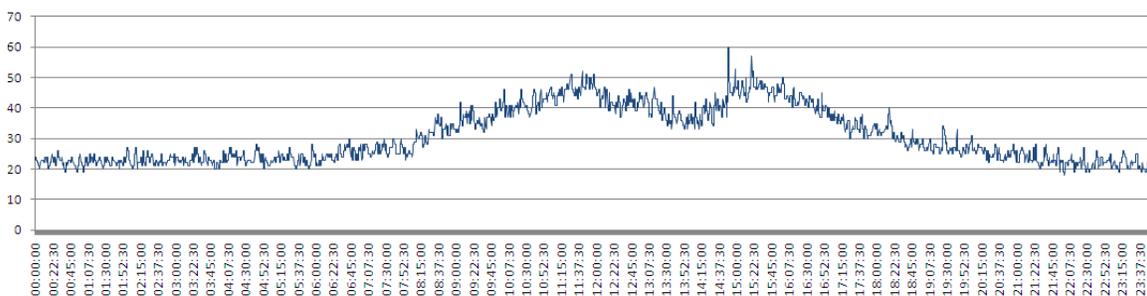


Figura 9-1. Variación en el consumo de potencia medido en kW durante un día.

Se tomó la información de un día y en base a ella se obtuvo la demanda, la cual se calculó tal y como lo realiza CFE, es decir, cada 5 minutos y en base al consumo de los 15 minutos anteriores (ventana deslizante de 5 minutos). La Figura 9-2 muestra la variación de la demanda en kW durante el mismo día que la gráfica de potencia mostrada anteriormente. Los cambios al inicio de esta gráfica, se deben a que se comienza en el primer punto graficado con un acumulado de cero, en el segundo punto graficado con un acumulado del primer subintervalo de 5 minutos y en el tercer punto con un acumulado de los primeros 10 minutos y ya a partir los 15 minutos todo se normaliza para obtener la demanda en base a los 15 minutos anteriores. Este transitorio inicial de operación, siempre existirá por lo cual habrá que tener en cuenta que el controlador de demanda requiere de un tiempo mínimo de estabilización de 15 minutos antes de que empiece a controlar las cargas en función de la demanda.

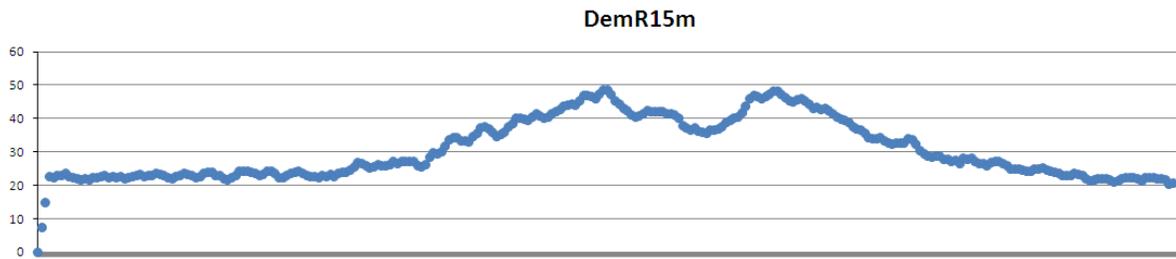


Figura 9-2. Variación de la demanda promedio en intervalos de 15 minutos durante un día.

La Figura 9-3, muestra la variación de la demanda durante un período de cinco horas. Estas demandas corresponden de las 13 a las 18 horas de la gráfica anterior. Solo se hace con propósito de ser más explícito en los resultados.

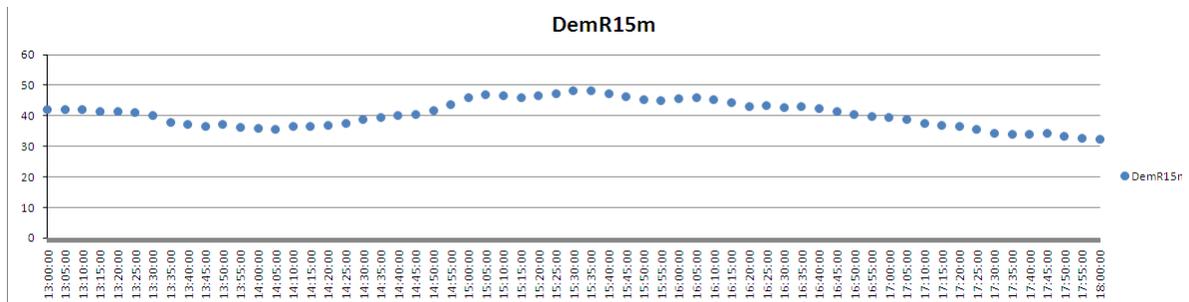


Figura 9-3. Variación de la demanda en kW durante cinco horas.

La gráfica de la demanda anterior inicializó su cálculo en el minuto cero. Después se procedió a generar las gráficas de las demandas correspondientes con un desfase en el inicio del cálculo de 1,2,3 y 4 minutos. Esto con el objetivo de realizar el estudio del efecto del desfase en el tiempo sobre la modificación del valor máximo de demanda obtenido para un mismo día.

Los resultados obtenidos para cada una de las demandas desfasadas en un minuto pero en ese mismo día en particular se presentan en la

Figura 9-4.

Desfasamiento:	0	1	2	3	4	Minutos
maxDR=	48.43333	48.81667	48.61667	48.63333	48.53333	kW

Figura 9-4. Demandas máximas obtenidas con diferentes desfasamientos.

Se observa que la diferencia entre el valor mayor y el menor de demanda máxima en cada uno de los casos es de 0.383 kW, lo cual viene siendo el 0.79% de variación con respecto a la demanda de menor valor. Es una variación muy

pequeña, menor al 1%, lo cual nos dice que casi no hay variación en el cálculo de la demanda máxima cuando su cálculo se desfasa.

A continuación se presenta el análisis de otro día de estudio pero con mayores valores de consumo de potencia.

La Figura 9-5 proporciona en forma gráfica el consumo de potencia en kW durante todo un día. Se observa que el consumo comienza a incrementarse a partir de las 6AM y vuelve a disminuir y regresar al consumo más bajo alrededor de las 9PM.

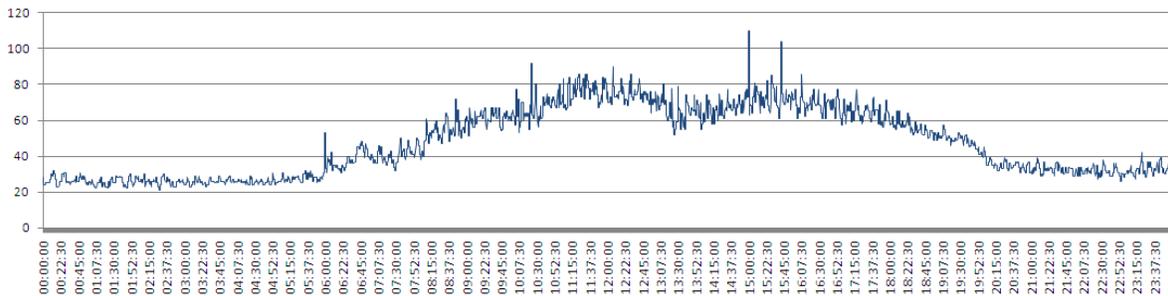


Figura 9-5. Variación en el consumo de potencia medido en kW durante un día.

La Figura 9-6 presenta el comportamiento gráfico de las demandas en kW, calculada de la forma como lo realiza CFE correspondiente a la gráfica de la potencia anterior.

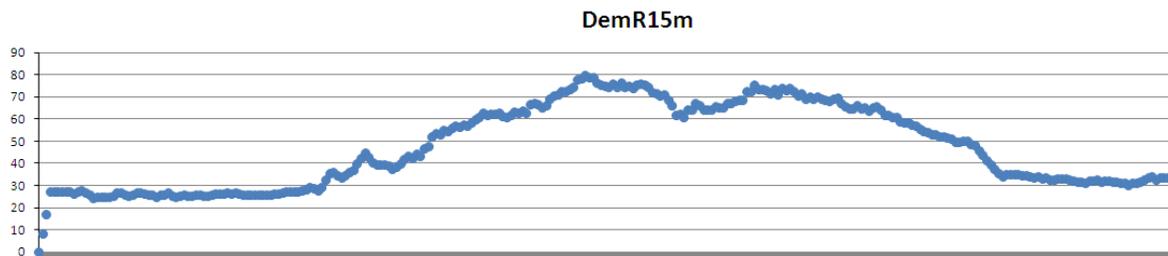


Figura 9-6. Variación de la demanda promedio en intervalos de 15 minutos durante un día.

La Figura 9-7 muestra la variación de la demanda de las 13hrs a 18hrs del mismo día de la gráfica anterior. Solo es para resaltar que el cálculo de la demanda se realiza cada 5 minutos en base al consumo de los 15 minutos anteriores.

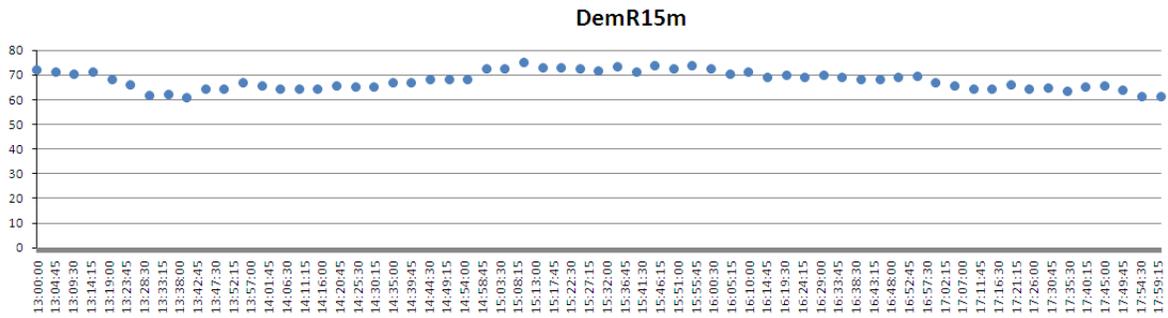


Figura 9-7. Variación de la demanda durante cinco horas.

La información de este día, nuevamente se analizó aplicando diferentes desfases en la información de potencia en el tiempo de 0, 1, 2, 3 y 4 minutos. Se analizó cada uno de los casos para obtener el valor máximo que alcanzó la demanda encontrando los valores que se muestran en la Figura 9-8.

Desfasamiento=	0	1	2	3	4	Minutos
maxDR:	79.51667	79.01667	78.96667	79.7	79.85	kW

Figura 9-8. Demandas máximas obtenidas con diferentes desfases.

Se tiene que la diferencia entre el valor mayor y el menor de demanda máxima entre los desfases es de 0.883 kW, lo cual viene siendo casi el 1% de variación con respecto a la demanda menor.

La conclusión con los dos casos presentados es que la variación en el cálculo de la demanda máxima sin estar sincronizados para el caso particular de la carga analizada, puede arrojar una variación menor del 1% con respecto al valor que manejaría CFE. Esto, si se desea, se puede compensar en el controlador de demanda simplemente haciendo que la máxima demanda permitida por el controlador sea el valor deseado menos el 1%. O bien, para hacer las cosas más fácilmente, simplemente restarle un kW, al valor de demanda máxima deseado cuando esta sea almacenada en el controlador.

La conclusión anterior nos permite colocar el controlador de demanda en cualquier lugar sin necesidad de estar junto al medidor de CFE, aunque lo recomendable es solicitar a CFE que instale un medidor que proporcione salida de pulsos proporcional al consumo de energía activa (kWh), energía reactiva (kVVARh) y el pulso de fin de subintervalo de 5 minutos.

9.2 Resumen de la operaciones que realiza el controlador de demanda

El controlador de demanda construido puede realizar varios tipos de operaciones que son las que a continuación se explican:

Monitor de potencia: Proporciona la potencia (kW) promedio consumida por cada intervalo de 15 segundos. Su valor se presenta en la pantalla y se actualiza cada 15 segundos.

Monitor de la demanda pronosticada: Proporciona la demanda que se pronostica que se tendrá al finalizar cada intervalo de 5 minutos. Esta demanda se actualiza cada 15 segundos. La demanda pronosticada para cada minuto es utilizada para el control de las cargas por demanda. La demanda pronosticada que aparece cada subintervalo de 5 minutos es realmente la demanda real que se tuvo en el intervalo de los 15 minutos anteriores. En la pantalla se despliega aparte del reloj de tiempo real, un contador de 5 minutos regresivo, el cual permite conocer el instante en que se cumple cada minuto y también el instante en que se cumple el subintervalo de 5 minutos.

Señal de alerta por rebase de la demanda máxima: Cada intervalo de 15 segundos, si la demanda pronosticada es mayor que la demanda máxima permitida, se encenderá un led que no se apagará hasta que la demanda pronosticada disminuya por debajo de la demanda máxima. Esta salida del controlador también puede ser utilizada para activar cualquier tipo de alarma auditiva o visual.

Registro de la demanda máxima: Cada subintervalo de 5 minutos se compara la demanda real del subintervalo que acaba de finalizar con la máxima registrada, si resulta mayor, se actualiza el valor así como el día, hora y minuto en que se registró. Su valor se puede consultar en cualquier instante a través de la pantalla correspondiente. Su objetivo es almacenar el valor máximo de demanda que se haya tenido en todo el período de observación que puede ser hasta de 10 días.

Controlador de hasta 8 cargas: Cuenta con ocho relevadores para poder controlar hasta ocho cargas. El valor del estado de cada una de las cargas (encendido o apagado) es almacenado en memoria cada minuto para posteriormente poder transmitirlo al computador y analizarlo en función del tiempo.

Control de encendido de cargas en función de la demanda: Se puede controlar la operación de hasta ocho cargas en función de la demanda existente y de una demanda máxima permisible especificada por el usuario en el controlador de demanda. Si el algoritmo de control requiere apagar una carga, se apaga la de menor prioridad y si requiere encender una carga, se enciende la de mayor prioridad.

Control de encendido de cargas en función de un horario: Las ocho cargas se pueden controlar en función exclusivamente de un horario de encendido y otro de apagado en forma individual. El control por horario lleva prioridad sobre el control por demanda en caso de que exista un traslape en sus horarios de operación.

Control manual de las cargas: Las ocho cargas pueden encenderse o apagarse directamente desde el teclado del controlador. Este control lleva prioridad sobre el control de demanda y el control por horario. Las cargas pueden encenderse y apagarse en forma individual, o en forma grupal.

Recolección de datos: El controlador de demanda almacena la siguiente información: a) La demanda pronosticada y el estado de cada una de las cargas en cada minuto. b) Cada 5 minutos la demanda real obtenida sobre los 15 minutos anteriores (ventana deslizante de 5 minutos). c) El número de día y la hora (sin minutos) en cada cambio de hora. Esto permite en la gráfica conocer el tiempo en que ocurre cada evento. Cada vez que se reinicializa el controlador se registran los minutos y se coloca cero en el número de día para realizar la distinción con el cambio real de hora en las gráficas generadas. El controlador de demanda solo cuenta con espacio para almacenar la información de las últimas 255 horas que equivale a unos 10 días.

Comunicación con la computadora: El controlador de demanda puede transmitir al computador: a) La programación de las cargas. b) La información recopilada. También se puede transmitir de la computadora al controlador de demanda, la programación de las cargas.

Software: Se hicieron los siguientes dos programas: a) El programador de cargas que permite hacer la programación de las cargas y visualizar en forma gráfica esta programación para posteriormente transmitirla al controlador de demanda, o bien, recibir la programación de las cargas desde el controlador y visualizarlas también en forma gráfica. b) El analizador de datos permite recibir la información recolectada por el controlador de demanda y graficarla para permitir su análisis. Estos programas están realizados sobre Excel, lo cual permite que no se requiera ser un experto en computación para realizar este manejo.

9.3 Ejemplos de operación del controlador de demanda

Se programaron varios ejemplos en el controlador de manera real simulando las cargas con cuatro focos donde cada uno generaba pulsos como si se tratara de una carga de 10kW. Los resultados para todos estos casos se presentan a continuación.

9.3.1 Ejemplo de control de cargas por horario

A continuación se presenta un ejemplo del comportamiento del controlador de demanda con cargas controladas en función de un horario y no por demanda (prioridad). Cuando así se desea, se deberá colocar en cada una de las columnas la siguiente información: a) Número de la carga a controlar. b) "No" hay control sujeto a demanda (prioridad). c) Selección de los días en que se encenderá la carga. d) Tiempo de encendido de la carga. e) Selección de los días en que se apagará la carga. f) Tiempo de apagado de la carga. En la Figura 9-9 se muestra un ejemplo de programación de once eventos distribuidos entre las cargas 1 a 4. Evento con carga asignada igual a cero no se utiliza.

Eventos para control de las cargas:

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Diario	23	40	Diario	23	43
2	2	No	Diario	23	43	Diario	23	46
3	3	No	Diario	23	46	Diario	23	49
4	4	No	Diario	23	49	Diario	23	52
5	3	No	Diario	23	52	Diario	23	55
6	2	No	Diario	23	55	Diario	23	58
7	1	No	Diario	0	1	Diario	0	4
8	1	No	Diario	0	7	Diario	0	28
9	2	No	Diario	0	10	Diario	0	25
10	3	No	Diario	0	13	Diario	0	22
11	4	No	Diario	0	16	Diario	0	19
12	0	Si	Diario	8	15	Diario	20	15
13	0	No	Diario	14	30	Diario	15	30
14	0	No	Diario	3	3	Diario	3	3
15	0	Si	Diario	4	4	Diario	4	4
16	0	Si	Diario	5	5	Diario	5	5

Figura 9-9. Ejemplo de programación de las cargas 1 a 4 por horario.

En la Figura 9-10 se muestra el resultado en forma gráfica de la información que almacenó el controlador durante la ejecución en el tiempo de los eventos anteriormente señalados. Esta información almacenada en el controlador fue transmitida al PC utilizando el programa de captura de información, el cual también generó en forma automática, la gráfica presentada. La resolución que se maneja en el tiempo es de un minuto. Las líneas verticales con su tiempo asignado fueron agregadas manualmente para mejor visualización de los resultados. El tiempo que si generó el controlador y que se adjuntó en forma automática a la gráfica son los cambios de hora como es el "0 15" que significa

hora 0 y día 15 y el “1 15” que significa hora 1 día 15. Estos tiempos de cambio de hora, sirven de referencia para ubicar exactamente el tiempo en que ocurren todos los eventos realizados por el controlador.

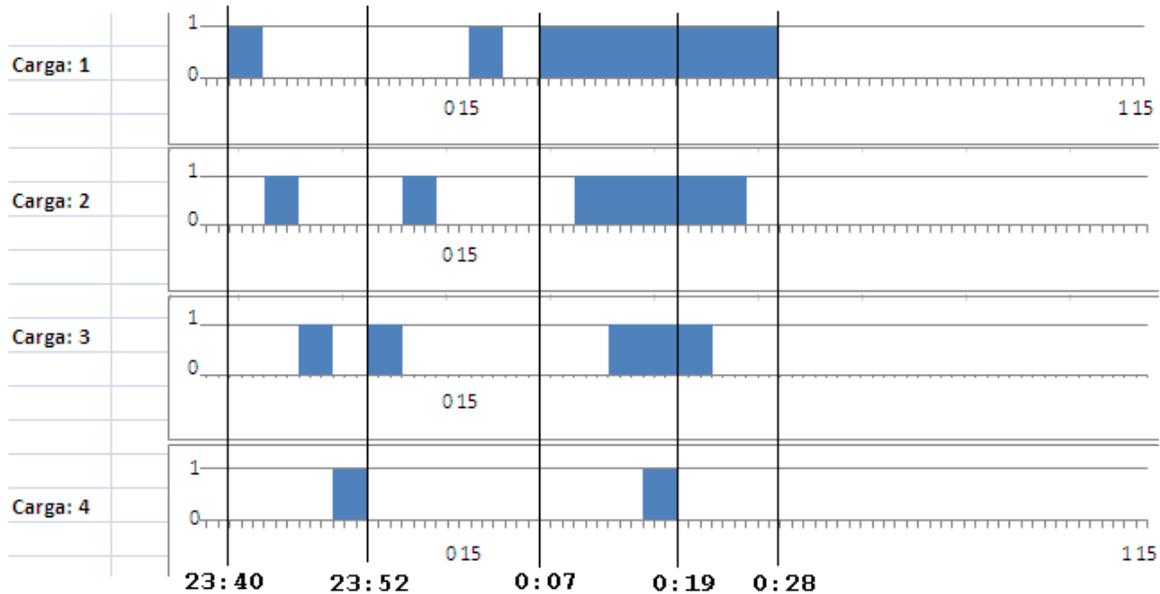


Figura 9-10. Resultados de la ejecución del control de cargas por horario.

Se observa que la gráfica anterior, refleja exactamente el comportamiento solicitado sobre las cargas por eventos que le fueron programados. Las cargas se encienden y se apagan en el momento en que fue solicitado.

9.3.2 Ejemplo de control por horario con encendido y apagado de cargas en forma manual

En la tabla de control de eventos de la Figura 9-11, se programó para que las cargas 1 y 2 se controlan por horario y de forma que todos los días se encendieran a las 17:00 horas y se apagaran a las 17:15 horas.

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	No	Diario	17	0	Diario	17	15
2	2	No	Diario	17	0	Diario	17	15
3	0	No	Diario	23	46	Diario	23	49
4	0	No	Diario	23	49	Diario	23	52

Figura 9-11. Tabla de control de eventos por horario de las cargas 1 y 2.

Dentro del control por horario se encendieron y se apagaron las cargas varias veces en forma manual desde el teclado del controlador por demanda. La

ejecución de los eventos se presenta en la Figura 9-12 ya en forma gráfica. Donde dice “ON” y “OFF” es que la carga se encendió y se apagó en forma manual desde el teclado. Se comprueba que lleva prioridad el control manual ya que las cargas se pudieron encender y apagar manualmente desde el teclado.

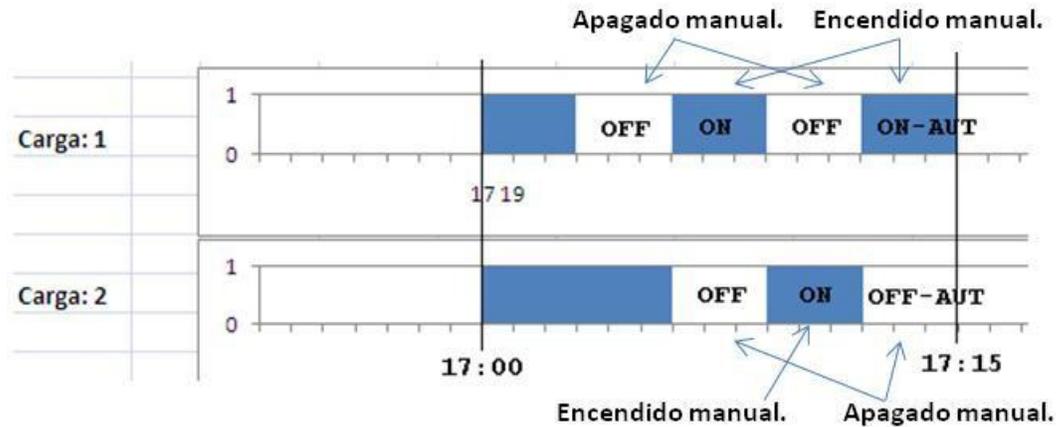


Figura 9-12. Resultados en el tiempo del control de eventos por horario con encendido y apagado de cargas en forma manual.

En la gráfica anterior se observa con respecto a la carga uno que al final se dejó la carga encendida pero en modo automático, lo cual significa que su operación ya depende del controlador. Al finalizar el tiempo por horario se observa que sí se apagó la carga. Con respecto a la carga dos, al final se dejó la carga apagada pero en modo automático. En el diseño del controlador se decidió que si en el control por horario la carga se apagada manualmente no se volvería a encender aunque se quedara en modo automático. Por lo anterior, se comprueba que la carga dos ya no se volvió a encender a pesar de que le faltaba tiempo para llegar a su tiempo de apagado.

9.3.3 Ejemplo de control por demanda con traslape por horario

En el diseño del controlador de demanda se tomó la decisión de que el control por horario lleva prioridad sobre el control por demanda. Si dentro de una zona de control por demanda se activa una zona con control por horario, la carga se encenderá y no podrá ser apagada por el control por demanda. Si en este tiempo de traslape el controlador requiere apagar una carga, se apagará la carga encendida que le sigue con una prioridad menor. Si el control por horario termina estando todavía dentro de la zona de control por demanda, la carga se apagará y pasará a ser controlada nuevamente en función de la demanda.

En la Figura 9-13 se observa la programación de las cargas 1 a 4 en función de la demanda desde las 19:00 hasta las 19:50. También se observa que se hizo un traslape de control por horario para la carga 4 de las 19:05 a 19:09 horas.

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	Si	Diario	19	0	Diario	19	50
2	2	Si	Diario	19	0	Diario	19	50
3	3	Si	Diario	19	0	Diario	19	50
4	4	Si	Diario	19	0	Diario	19	50
5	4	No	Diario	19	5	Diario	19	9
6	0	No	Diario	19	13	Diario	19	17
7	0	No	Diario	0	1	Diario	0	4

Figura 9-13. Eventos en donde se activan las cargas 1 a 4 por demanda (prioridad). La carga 4 se traslapada por horario del minuto 5 al 9.

En la Figura 9-14 se presenta en forma gráfica el comportamiento en el tiempo del controlador de demanda en base a la tabla de eventos dados. Las cargas controladas son de 10kW cada una y se fijó una demanda máxima permisible con valor de 25kW, lo cual hace que en promedio solo dos cargas deberán estar encendidas al mismo tiempo. A las 19:00 empieza el control por demanda de las cargas por lo que al minuto se enciende la carga uno y al siguiente minuto se enciende la carga dos y se dejan de encender cargas ya que la máxima permisible es 25 kW. A las 19:05 se enciende por horario la carga 4 con lo que la demanda máxima permisible es rebasada. Después de un minuto la carga 2, que es la de menor prioridad de las que están encendidas, es apagada. A las 19:09 la carga 4 es apagada por horario por lo que al minuto el controlador vuelve a encender la carga 2 ya que hay capacidad para ella.

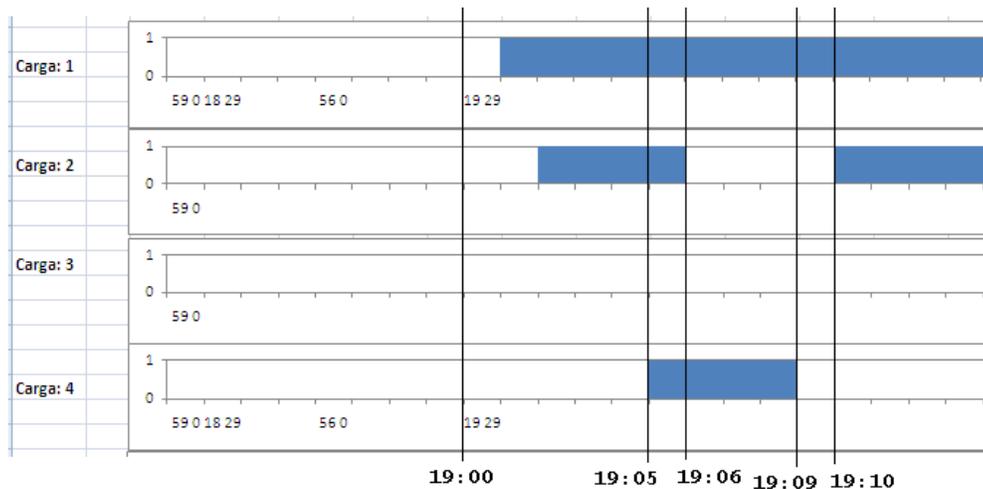


Figura 9-14. Resultado de encender la carga 4 por horario dentro de su control por demanda.

Descripción de los eventos de la Figura 9-14:

- 19:00 Se activa control por demanda a una demanda máxima de 25kW por lo que se empiezan a encender las cargas 1 y 2. Ya no se encienden más porque se rebasaría el límite propuesto.
- 19:05 Se enciende la carga 4 por control de horario haciendo que la potencia consumida sea de 30kW (cada carga es de 10kW) por lo que se tendrá que apagar una carga.
- 19:06 EL controlador por demanda apaga la carga 2, ya que es la carga encendida de menor prioridad y se está excediendo la máxima carga.
- 19:09 Se apaga la carga 4 por control de horario dejando capacidad para encender otra carga.
- 19:10 El controlador por demanda encienda la carga 2 ya que es la carga de mayor prioridad de las que están apagadas.

9.3.4 Ejemplo de control de cargas por demanda

El control por demanda permite que cuando hay capacidad disponible se encienden las cargas y que cuando se exceda la capacidad disponible se paguen las cargas de acuerdo al algoritmo presentado en la sección de operación del controlador de demanda. Aquí se demuestra en forma real la operación del controlador de demanda en el control por demanda de cuatro cargas de 10kW cada una. La Figura 9-15, muestra la tabla de eventos que se cargó al controlador de demanda en donde indica que de 20 a 23 horas todos los días, se activan las cargas 1,2,3 y 4 para ser controladas en función de la demanda (prioridad).

	Carga	Manejar	Tiempo de encendido.			Tiempo de apagado.		
	Asignada	Prioridad:	Día:	Hora:	Minutos	Día:	Hora:	Minutos:
1	1	Si	Diario	20	0	Diario	23	0
2	2	Si	Diario	20	0	Diario	23	0
3	3	Si	Diario	20	0	Diario	23	0
4	4	Si	Diario	20	0	Diario	23	0
5	0	No	Diario	23	52	Diario	23	55
6	0	No	Diario	23	55	Diario	23	58

Figura 9-15. eventos en donde se activan las cargas 1,2,3 y 4 con control por demanda de las 20 horas hasta las 23 horas de todos los días de la semana.

La operación del controlador de demanda sobre las cuatro cargas se aprovechó para realizar diferentes pruebas. Recordar que el controlador permite en forma manual el encendido y apagado de cada una de las cargas y que además estas se pueden colocar en tres estados diferentes (ON/OFF/AUT). En el estado ON, la carga se enciende y no puede ser apagada. En el OFF, la carga se apaga y no puede ser encendida. En AUT, la carga permanece en el estado que se haya

puesto pero podrá ser apagada o encendida por el controlador de acuerdo a la demanda que exista.

Las diferentes pruebas que se realizaron son:

1. Dado un valor de demanda máxima permisible, las cargas se comenzarán a encender sin llegar a rebasar este valor con un tiempo entre encendidos de uno a dos minutos. Lo anterior estará sujeto a que la demanda pronosticada sea menor a la demanda máxima permisible.
2. Si el valor de la demanda máxima permisible se reduce en forma manual en el controlador, las cargas se comenzarán a apagar hasta que la potencia sea menor que la demanda máxima permisible y hasta que la demanda pronosticada también sea menor que la demanda máxima permisible.
3. Si estando en el nivel límite de encendido de cargas, se enciende en forma manual una carga más, el controlador procederá a apagar la carga de menor prioridad que esté en función de la demanda.
4. Si estando en el nivel máximo de encendido de cargas, se paga una carga en forma manual, el controlador procederá a encender la carga de mayor prioridad que esté en función de la demanda.
5. Apagado de todas las cargas al mismo tiempo en forma manual para que el controlador nuevamente las comience a encender si es que se encuentran en en función de la demanda.

Todas estas pruebas fueron realizadas y los resultados se presentan en la Figura 9-16.

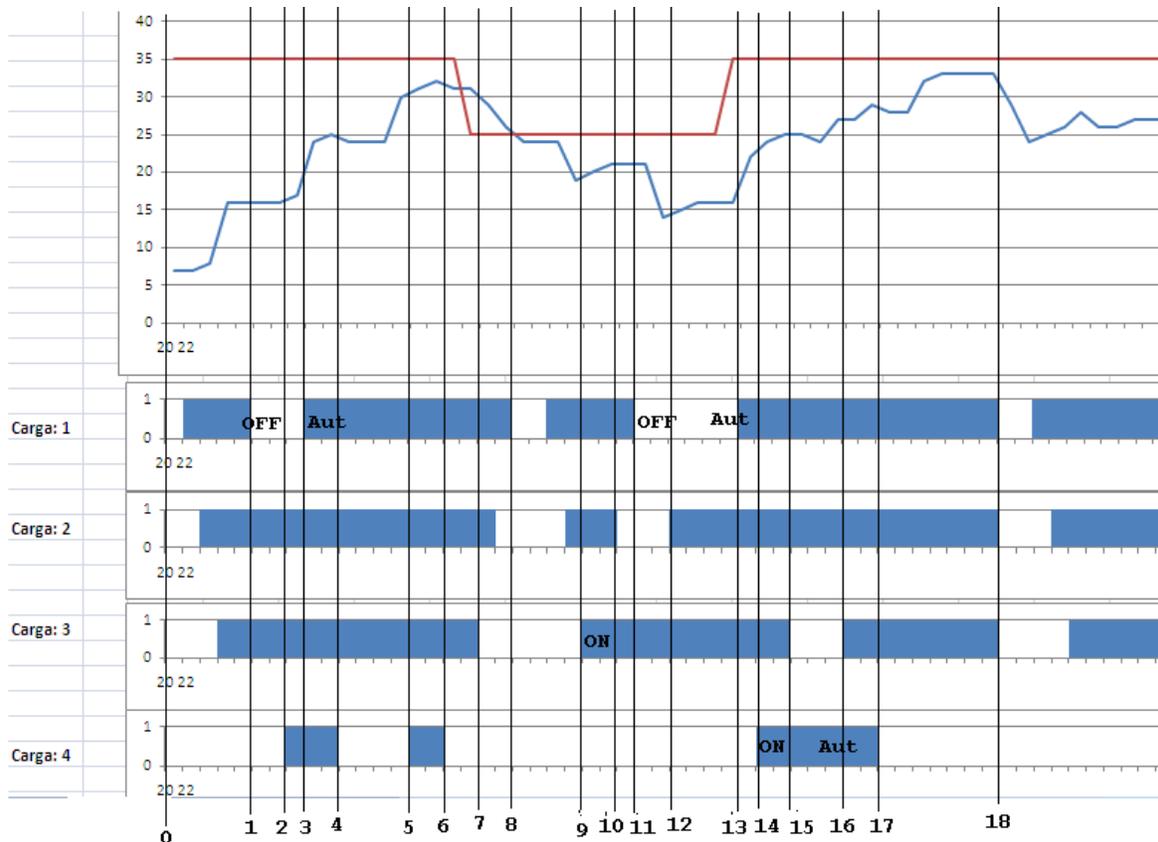


Figura 9-16. Operación del controlador de demanda sobre cuatro cargas de 10kW cada una.

Descripción de los eventos de la Figura 9-16.

0. Inicia control por demanda con una demanda máxima de 35kW por lo que se comienzan a encender las cargas 1,2 y 3.
1. Se apaga manualmente la carga 1 con OFF para que no se vuelva a encender.
2. Se enciende carga 4 ya que hay capacidad de carga.
3. Se enciende manualmente la carga 1 en Aut.
4. Se apaga la carga 4 por exceso de carga.
5. Se enciende manualmente la carga 4.
6. Se apaga la carga 4 por exceso de carga.
7. Se baja la demanda máxima a 25kW y se comienzan a apagar las cargas.
8. Se apagan todas las cargas porque la demanda pronosticada todavía es mayor a la máxima.
9. Se prende manualmente la carga 3 con ON activado.
10. Se paga la carga 2 por exceso.
11. Se apaga manualmente la carga 1 con OFF.
12. Se prende la carga 2 porque hay capacidad.
13. Se coloca a 35 la demanda máxima por lo que se enciende la carga 1.
14. Se prende manualmente con ON la carga 4.

15. Se paga la carga 3 por exceso.
16. Se enciende manualmente la carga 3.
17. Se apaga la carga 4 por exceso.
18. Se apagan todas las cargas manualmente y después comienzan a encenderse las cargas 1,2 y 3 porque hay capacidad.

9.4 Efecto del valor de alfa en el control por demanda (prioridad)

Se estableció que la ecuación utilizada para obtener la potencia pronosticada, es decir, la potencia que habrá en el siguiente intervalo de 15 segundos y la cual es función de la potencia real y su pronóstico es la siguiente:

$$P_{pro_{t+1}} = \alpha P_t + (1-\alpha)P_{pro_t} \quad (9-1)$$

En esta ecuación, el valor de alfa es la razón de amortiguamiento que puede también ser interpretada como la credibilidad que sobre la potencia real se tiene. Si el valor de alfa es pequeño, la curva de potencia pronosticada es muy suave, pero conforme alfa tienda a uno, la potencia pronosticada tenderá a la potencia real y esto generará una curva con cambios bruscos.

Al realizar las simulaciones donde el control de las cargas era en función de la demanda existente, se observó que con valores pequeños de alfa, las cargas se van activando a una razón de una por minuto pero se rebasaba la potencia máxima permisible. Esto era debido a que cuando el valor de alfa es muy pequeño, hace que la potencia pronosticada cambie muy lentamente y por lo tanto la capacidad disponible, que se calcula como lo muestra gráficamente la Figura 9-17, también cambie lentamente. Cada minuto se compara la potencia que demanda la carga desactivada de mayor prioridad contra la capacidad disponible y si es menor se activará. El cambio lento en la capacidad disponible hará que se activen cargas de más. Posteriormente, cuando el valor de la potencia pronosticada rebasa el valor máximo permisible, las cargas activadas en exceso comenzaran a ser desactivadas. Estos encendidos y apagados de cargas durante muy poco tiempo son molestos e indeseables en la operación real.

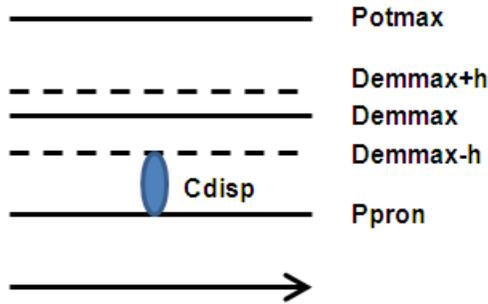


Figura 9-17. La carga que se activa debe ser menor a la capacidad disponible.

Se encontró que el controlador operaba muy bien, cuando el valor de alfa seleccionado lograba al minuto un incremento mínimo del 90% del valor final del incremento en la potencia demandada. En la gráfica de la Figura 9-18 se presentan la variación en la potencia pronosticada para diferentes valores de alfa ante un incremento de potencia demandada de 10kW al inicio del minuto.

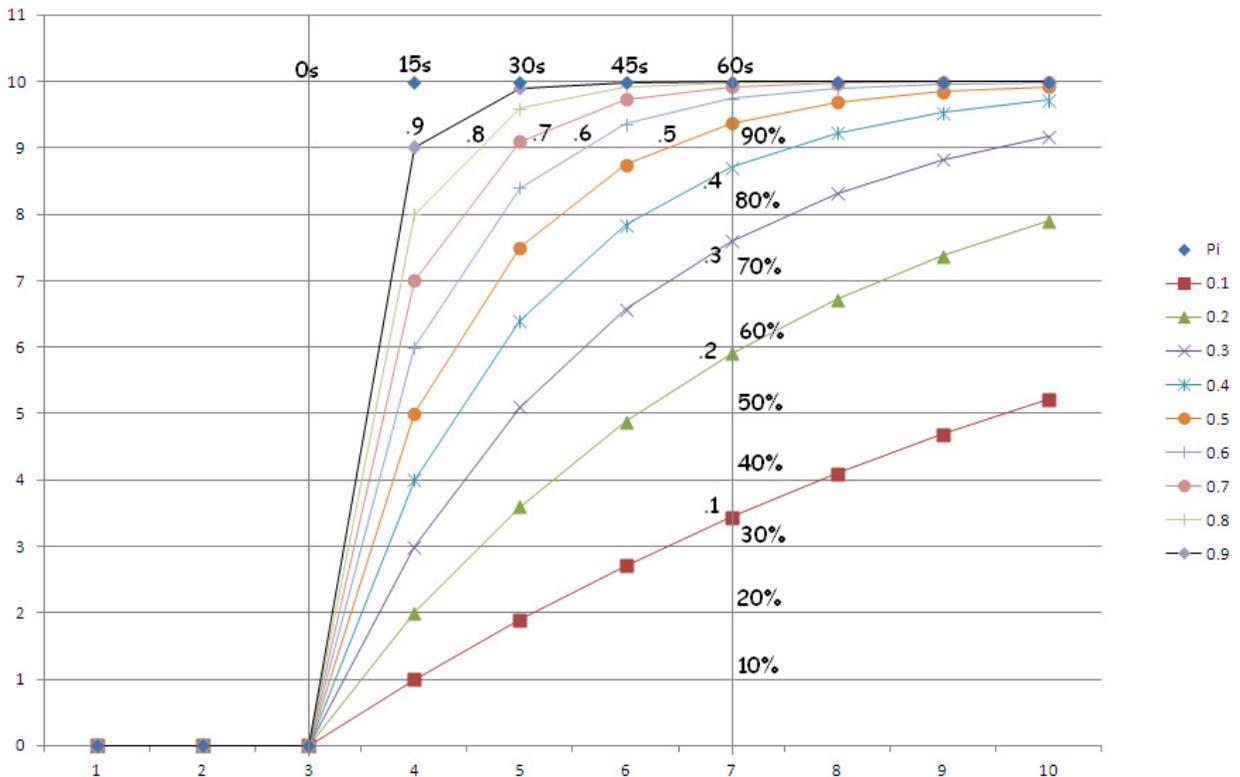


Figura 9-18. Incrementos en la potencia ante un escalón de 10kW y diferentes valores de alfa.

Se observa en la gráfica que para lograr en un minuto un incremento mínimo del 90% del valor final, el valor de alfa debe ser mínimo del 0.5. Este valor se utilizó en el controlador y se observó que evitó la activación extra de cargas como lo hacía

por ejemplo un valor de alfa igual a 0.3. No se recomienda un valor muy alto de alfa ya que hace que la potencia pronosticada tienda a valer igual a la potencia instantánea, lo cual generaría un encendido y apagado frecuente de las cargas ante cualquier variación en la demanda. El objetivo del valor de alfa, es precisamente suavizar estos cambios. El controlador trabajó muy bien con valores de alfa iguales 0.6 y 0.7 que son los recomendados a utilizar.

10 Comentarios y conclusiones

El cargo por demanda facturable representa un porcentaje importante de la facturación de energía eléctrica. Mediante un control adecuado de la demanda máxima es posible reducir el cargo por este concepto. En base a lo anterior decidí diseñar un controlador de demanda de fácil manejo, bajo costo, lo más versátil posible y que incluyera comunicación con un computador.

Las características del prototipo construido son: 1) Utilización de pocos componentes electrónicos comunes y de bajo costo. 2) Control de hasta ocho cargas tanto en función del tiempo como en función de la demanda de energía. 3) Recopilación y almacenamiento del estado de las cargas y de la medición de la demanda. 4) Dos programas que permiten la comunicación del controlador con el computador. Todos los componentes electrónicos utilizados en el prototipo son de uso común y de bajo costo. El componente de mayor costo es el medidor de energía pero como es una componente externa del controlador puede ser utilizado cualquier medidor existente en la industria que genere pulsos secos como interface. Como son dispositivos de uso muy común, su costo también es bajo llegando a costar menos de cincuenta dólares. También podría ser utilizado como medidor de energía los medidores de CFE ya existentes. En el caso de adquirir el propio medidor de energía, permitirá realizar mediciones o caracterizaciones de las cargas tanto en forma individual o por zonas dentro de la empresa, lo cual aumenta la versatilidad del dispositivo. También se puede controlar la operación de hasta ocho cargas en dos formas. La primera es por tiempo, aquí se programa el tiempo de encendido y apagado de cada una de las ocho cargas hasta por un período de una semana. La segunda forma es en función de la demanda máxima establecida por el usuario. Aquí se permite que varias cargas puedan coincidir en la operación pero se lleva el control de la operación de las mismas de forma tal que no se rebase esa demanda máxima establecida. El control se basa en la prioridad asignada a cada una de las cargas activadas. El controlador, durante el tiempo de operación, almacena en memoria el estado de cada de las ocho cargas en cuanto a encendido o apagado con una resolución de un minuto. También almacena en memoria el valor de la demanda que se pronostica que habrá en cada minuto. El valor que toma esta demanda cada cinco minutos coincidirá con el valor real de la demanda registrada por CFE.

Se hicieron dos programas que permiten la comunicación del controlador con un computador. El primer programa permite realizar la programación de los eventos de las ocho cargas desde Excel en una forma mucho más amigable. La captura se hace a través del llenado de una tabla y automáticamente se genera en forma gráfica y en función del tiempo la distribución de la programación de las ocho cargas durante el tiempo de una semana. Esto permite rectificar en forma visual la programación de los eventos. El segundo programa permite transferir al computador la información recopilada por el controlador y depositarla en Excel. Una vez transferida la información, el programa genera automáticamente la

gráfica en función del tiempo tanto de la demanda como del estado de cada una de las cargas. El programa permite seleccionar el tiempo de visualización en la gráfica para permitir un análisis más detallado de lo que sucedió en ese tiempo tanto con la demanda como con el estado de las cargas.

La operación del prototipo se demostró a través de un tablero físico que contenía ocho focos que simulaban cada una de las cargas. Se demostró su operación tanto del control de las cargas en el tiempo como el control de las mismas en función de la demanda. Se generaron las gráficas de la operación en el tiempo para demostrar el correcto funcionamiento del controlador.

Realmente lo laborioso fue la programación del microcontrolador así como la construcción de los dos programas que permiten su conexión al computador. Siempre se tuvo dentro de los objetivos que para el manejo del dispositivo no se requiriera de una preparación técnica. Todo se trató de diseñar de la forma más lógica posible y además se tomaron ideas de la forma como se programan dispositivos de uso común en los hogares. También se trató de que permitiera, aparte de controlar la demanda máxima, realizar estudio del comportamiento tanto de la demanda como del encendido de las cargas para detectar áreas de oportunidad para reducir tanto la demanda máxima como el consumo de energía. Siempre se tuvo en mente de que el controlador sirviera también como una herramienta que permitiera concientizar al usuario de la importancia de la programación de las cargas para ahorrar en la facturación del consumo de energía eléctrica principalmente en el rubro de la demanda.

11 Recomendaciones para trabajos futuros

A continuación se describen mejoras, cambios o nuevas opciones que podrían realizarse en un futuro al controlador de demanda presentado.

Permitir que el tiempo de lectura para los pulsos de entrada que llegan del medidor de energía no esté fijo a 15 segundos, si no que pueda ser variado en función de la razón con la que llegan los pulsos de la energía medida para permitir una mejor resolución en las operaciones de control realizadas.

La comunicación con el PC sea directamente por USB en lugar de realizarse por el puerto serial e interface RS-232.

Ampliar la operación del controlador a la tarifa H-M, que opera tres horarios que son el de punta, intermedio y base. Se tendrían que definir tres demandas máximas permisibles, una para cada horario.

Agregar el control de lazo cerrado. Ahorita el control es de lazo abierto, no existe retroalimentación de si las cargas fueron exitosamente encendidas o apagadas.

Agregar al control de las cargas un tiempo mínimo de encendido y un tiempo mínimo de apagado.

Permitir la sincronización con los medidores de CFE en cuanto a pulsos de energía activa y de subintervalos de 5 minutos.

Agregar módulos de comunicación inalámbrica con el medidor de CFE.

Agregar módulos para el control inalámbrico de las cargas.

12 Anexo 1. Manual de operación

12.1 Teclado

El controlador dispone de un teclado como el que muestra la Figura 12-1 para facilitar su operación. Dispone de teclas de avance horizontal (“<”, “>”) y vertical (“^”, “v”). Con “OK” se avanza a la siguiente pantalla dando por aceptada la información que se haya capturado.



Figura 12-1, Teclado del controlador de demanda.

12.2 Pantalla principal

El controlador de demanda inicia en la pantalla principal que se muestra en la Figura 12-2.



Figura 12-2. Pantalla principal del controlador.

Esta pantalla despliega la siguiente información:

- Tiempo actual: hh:mm:ss.
- Tiempo que falta para completar el tercer subintervalo de 5 minutos: m:ss.
- Pulsos que han llegado durante el subintervalo actual de 15 segundos.
- Potencia promedio en el subintervalo anterior de 15 segundos dada en kW.
- Demanda que se pronostica que se tendrá al término del tercer subintervalo de 5 minutos dada kW.

12.3 Pantalla de la demanda máxima registrada

Si estando en la pantalla principal se oprime la tecla “0”, aparece la pantalla de la Figura 12-3. Después de 5 segundos o bien oprimiendo la tecla “OK” se regresa a la pantalla principal.

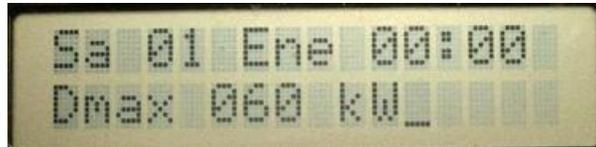


Figura 12-3. Pantalla donde se presenta la demanda máxima registrada y la fecha en que ocurrió.

Esta pantalla despliega la siguiente información:

- Fecha y tiempo en que se obtuvo la demanda máxima registrada en formato: Día, fecha, mes y hh:ss.
- Valor de la demanda máxima registrada en kW.

12.4 Pantalla para el control ON/Auto/OFF de cada una de las cargas

En esta pantalla se realiza el control manual de operación de las cargas. Si estando en la pantalla principal se oprime cualquiera de las teclas del “1” al “8”, se presentara la pantalla de la Figura 12-4 correspondiente al estado actual de la carga. Dependiendo de la carga seleccionada se podrá seleccionar con las teclas de movimiento lateral la opción deseada entre las siguientes:

- ON: Se enciende la carga seleccionada.
- OFF: Se apaga la carga seleccionada.
- Auto: El estado de la carga permanece pero su estado futuro queda sujeta al controlador de demanda.



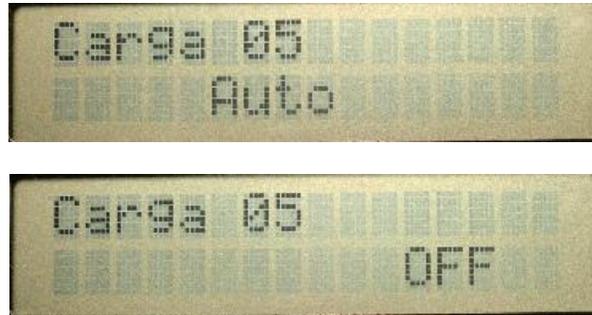


Figura 12-4. Pantallas en donde se define el estado ON/Auto/OFF de cada carga.

12.5 Sección de ajustes

Para entrar a la sección de ajuste habrá que oprimir en forma simultánea las teclas “<” y “OK” como lo muestra la Figura 12-5.



Figura 12-5. Al oprimir simultáneamente las dos teclas señaladas se entra a la sección de ajustes.

12.6 Pantalla inicial de la sección de ajustes

Al entrar a la sección de ajustes se presenta la pantalla de la Figura 12-6 en donde se podrá seleccionar entre cuatro opciones que a continuación se describen.

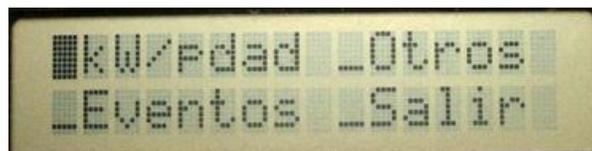


Figura 12-6. Pantalla donde se selecciona entre cargas/eventos/otros.

12.7 _kW/pdad

Al oprimir **_ kW/pdad** aparece la pantalla en donde se puede variar la potencia en Kw asignada a cada una de las cargas de la 1 a la 4. Al oprimir la tecla "OK" se permite variar las cargas 5 a 8, como lo muestra la Figura 12-7.

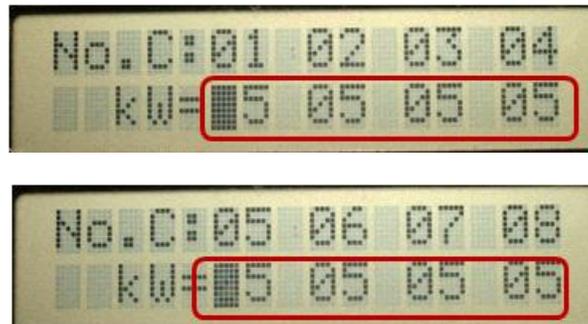


Figura 12-7. Pantallas donde se actualiza el valor de cada carga conectada en kW.

Al dar "OK" se avanza a la pantalla que permite alterar las prioridades asignadas a cada una de las cargas como lo muestra la Figura 12-8.

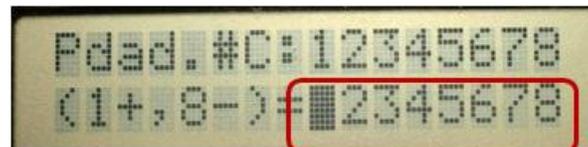


Figura 12-8. Pantalla para actualizar la prioridad asignada a cada carga.

12.8 _Otros

Al oprimir **_Otros** se obtiene la pantalla que se muestra en la Figura 12-9. Aquí se puede seleccionar entre Reloj/Parámetros/Datos al PC/Salir.

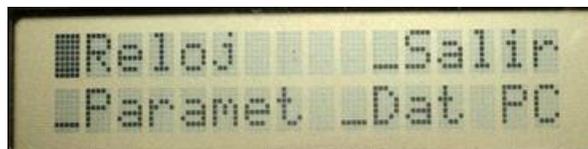


Figura 12-9. Pantalla donde se selecciona entre Reloj/Parámetros/Transmisión a PC.

12.9 _Reloj

En esta pantalla se ajusta la fecha, hora y día como lo muestra la Figura 12-10.

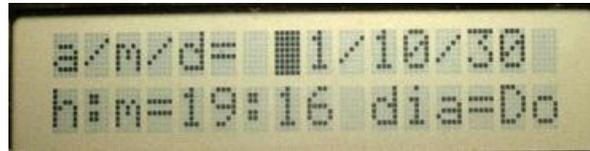


Figura 12-10. Pantalla donde se actualiza la fecha.

12.10 _Salir

Aquí se regresa a la pantalla principal de ajustes.

12.11 _Paramet

En esta pantalla se puede variar el parámetro de la holgura y el parámetro de la máxima potencia permisible establecida por el usuario como lo muestra la Figura 12-11.

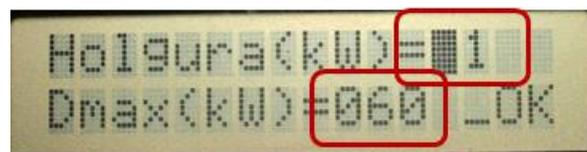


Figura 12-11. Pantalla donde se define el tamaño de holgura.

Al dar "OK" en la pantalla anterior se presenta la pantalla de la Figura 12-12. Aquí se permite variar el factor de amortiguamiento. Se introduce un valor entero entre 0 y 9 pero internamente equivale a un valor de 0.1 a 0.9.

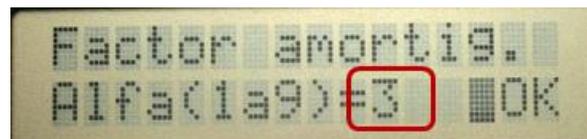


Figura 12-12. Pantalla donde se define el factor de amortiguamiento.

Al dar "OK" en la pantalla anterior se muestra la pantalla de la Figura 12-13. Aquí se permite variar el valor del multiplicador de pulsos de acuerdo al medidor de energía utilizado. Por ejemplo, para uno de 1600p/kWh se coloca un valor de 16.

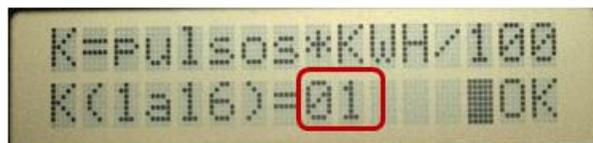


Figura 12-13. Pantalla donde se define el valor del multiplicador Ka.

12.12 _Dat PC

Aquí aparece la pantalla de la Figura 12-14. Ahora hay que asegurar que el controlador esté conectado al computador para poder transmitir al PC la información recopilada. En el computador se define la cantidad de horas de información que se desea que se le transmita. Se tiene una capacidad de almacenamiento en el controlador de 255 horas que equivale a 10 días de información.

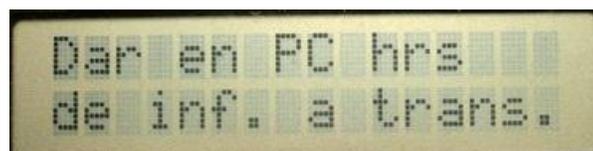


Figura 12-14.- Pantalla en donde espera las horas que transmitirá al PC.

12.13 _Eventos

Aquí aparece la pantalla que se muestra en la Figura 12-15 y es donde se permite generar o editar nuevos eventos de control. También estos eventos generados pueden ser transmitidos al computador (PC) o bien crear los eventos en el computador y transmitirlos al controlador.

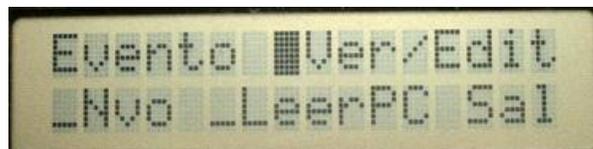


Figura 12-15. Pantalla donde se selecciona el ver o editar los eventos.

Al oprimir **Sal** se regresa a la pantalla anterior.

12.14 _Nvo

Aquí sale la pantalla que se muestra en la Figura 12-16 y que permite generar un evento nuevo para una carga determinada.

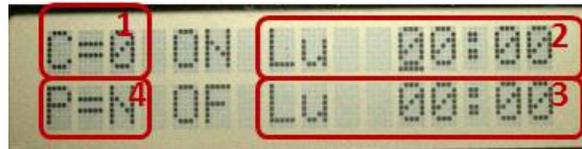


Figura 12-16. Pantalla para generar un nuevo evento.

12.15 _Ver/Edit

Aquí se presenta la pantalla que se muestra en la Figura 12-17 y es donde se selecciona la carga de la que se desean ver o editar los eventos que sobre ella existen.

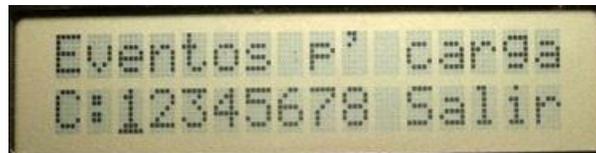


Figura 12-17. Pantalla de selección de carga para ver sus eventos asociados.

Una vez seleccionada la carga van saliendo en serie todos sus eventos como lo muestra la Figura 12-18, si es que existen, en donde en cada uno de ellos podrá ser alterada su información. El número de asignado de carga no se puede asignar a otra carga pero si se puede hacer C=0 con lo que se elimina el este evento.

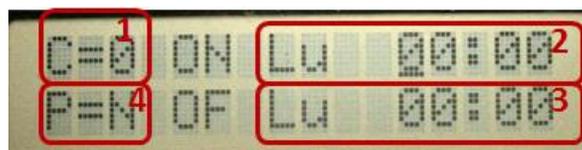


Figura 12-18. Pantalla de información por evento.

12.16 _LeerPC

Aquí aparece la pantalla que se muestra en la Figura 12-19. Si el controlador está conectado al computador, se permitirá transmitir los eventos guardados al PC o bien los eventos almacenados en el PC transmitirlos al controlador. El control de la dirección de transmisión se hace desde el PC.

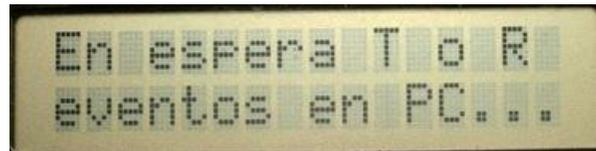


Figura 12-19. Pantalla de espera por transmisión o recepción de eventos.

12.17 **Todos los ajustes anteriores en forma gráfica**

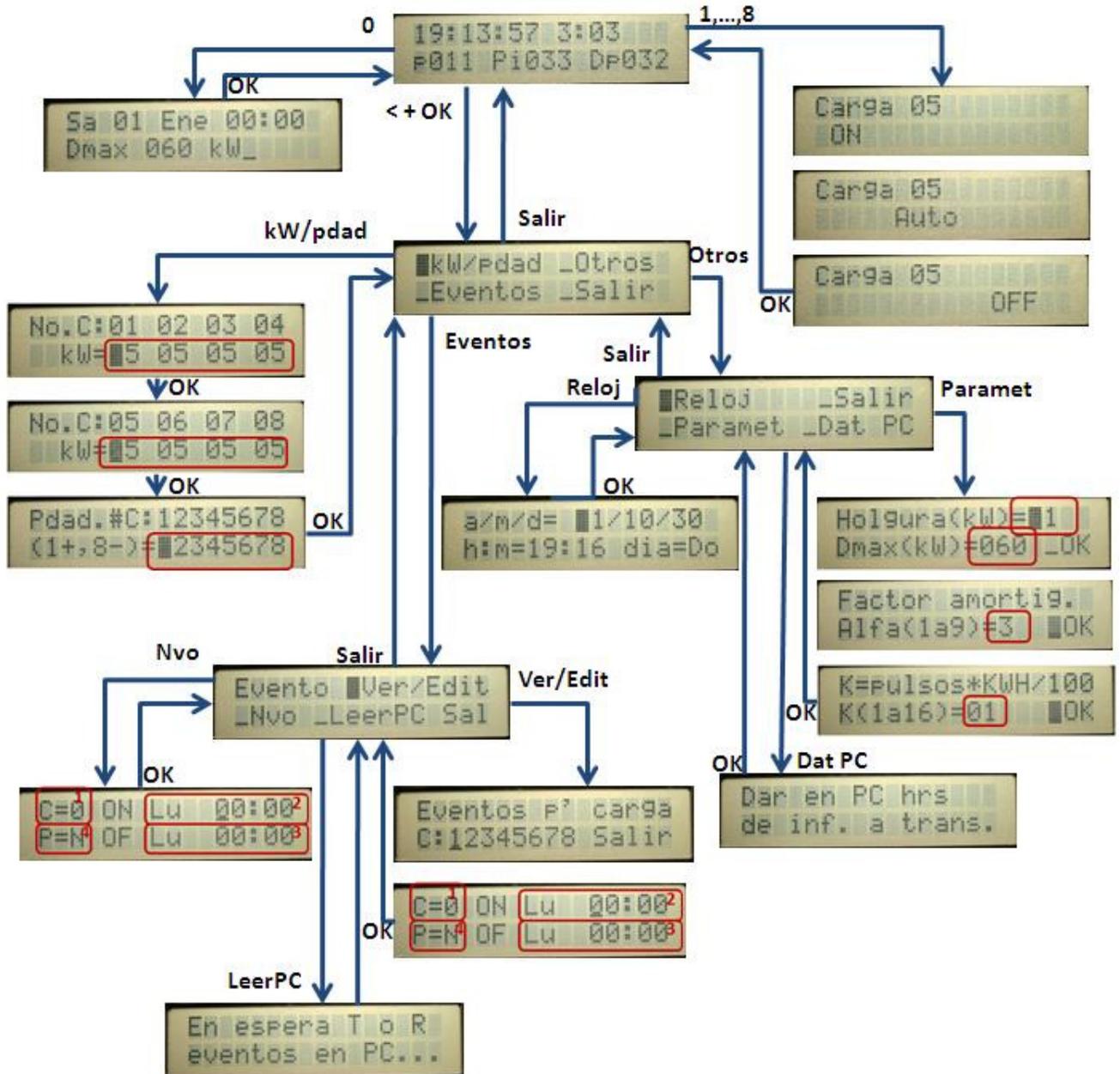


Figura 12-20. Resumen de las pantallas que contiene el controlador de demanda.

13 Bibliografía

- [1] [Online]. <http://cenergroo.gob.mx/doctos/generacionhorario.pptx>
- [2] [Online].
http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4687/3/Informacion_control_demanda.pdf
- [3] [Online].
http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6849/2/manual_m_cd_ind.pdf
- [4] Charles A. Alexander and Matthew N.O. Sadiku,.: Mc.Graw Hill, 2007.
- [5] [Online].
www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4687/3/Tarifas_electricas_2002.ppt
- [6] [Online].
http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/Seminario_Horarias.pdf
- [7] [Online]. <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>
- [8] CFE, ""INSTRUCTIVO PARA LA INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS TARIFAS PARA EL SUMINISTRO Y VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA", " Comisión Federal de Electricidad., Noviembre de 2004.
- [9] Daniel Peña, George C. Tiao, and Ruey S. Tsay, *A course in Time Series Analysis.*: John Wiley & Sons. Inc, 2001.
- [10] Bruce L. Bowerman and Richard T. O'Connell, *Forecasting and Time Series, an applied approach.*, Third Edition ed.: Duxbury Press, 1993.
- [11] H. K. Temraz, M. M.A. Salama, and A. Y. Chikhani, "Review of electric load forecasting methods," in *Electrical and Computer Engineering.*, 1997, pp. 289-292 vol.1.
- [12] Ivan Fernández, Cruz E. Borges, and Yoseba K. Peña, "Efficient Building load forecasting.," in *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2011, pp. 1-8.

- [13] Yoseba K. Peña, Cruz E. Borges, Denis Agote, and Iván Fernández, "Short-term load forecasting in air-conditioned non-residential Buildings.," in *AFRICON*, 2011, pp. 1-6.
- [14] Ehab E. Elattar, Goulernas John, and Q. H. Wu, "Electric Load Forecasting Based on Locally Weighted Support Vector Regression," *IEEE Transactions on Systems*, vol. 40, no. 4, pp. 438-447, July 2010.
- [15] Zhonghui Luo, Sottile Joseph, and Jon C. Yingling, "An MILP Formulation for Load-Side Demand Control," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 26, no. 9, 1998.
- [16] Eva González-Romera, Miguel A. Jaramillo-Morán, and Diego Carmona-Fernández, "Monthly Electric Energy Demand Forecasting Based on Trend Extraction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1946-1953, November 2006.
- [17] Schneider Electric, "ION Reference, ION Architecture & ION Modules," Schneider Electric, Reference guide 70002-0290-03, 9/2010.
- [18] [Online]. <http://www.etc.ugal.ro/cchiculita/software/picbootloader.htm>
- [19] [Online]. <http://home.comcast.net/~hardandsoftware/NETCommOCX.htm>
- [20] [Online]. <http://www.chinaenergymeter.es/1b-DTS238-DIN-rail-meter-2.html>