

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

SAVIO ALENCAR MACIEL

**CONTROLADOR DE DEMANDA E EMULADOR DO CONSUMIDOR
RESIDENCIAL PARA MANUTENÇÃO DO CONFORTO DO USUÁRIO
EM SMART GRIDS**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2014

SAVIO ALENCAR MACIEL

**CONTROLADOR DE DEMANDA E EMULADOR DO CONSUMIDOR
RESIDENCIAL PARA MANUTENÇÃO DO CONFORTO DO USUÁRIO
EM SMART GRIDS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Giovani Carati

Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin

PATO BRANCO

2014

M152c Maciel, Savio Alencar.
Controlador de demanda e emulador do consumidor residencial para
manutenção do conforto do usuário em Smart Grids / Savio Alencar Maciel.
-- 2014.
126 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Giovani Carati
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR,
2014.
Bibliografia: f. 123 – 126.

1. Smart Grid. 2. Controlador de demanda. 3. Gerenciamento de
energia. I. Carati, Emerson Giovani, orient. II. Denardin, Augusto Weber,
coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação nº 032

**Controlador de Demanda e Emulador do Consumidor Residencial para
Manutenção do Conforto do Usuário em *Smart Grids***

por

Sávio Alencar Maciel

Dissertação apresentada às oito horas do dia vinte de outubro de dois mil e quatorze, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello
UFSM/Santa Maria-RS

Prof. Dr. Emerson Giovanni Carati
UTFPR/PB
(Orientador)

Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin
UTFPR/PB

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay
UTFPR/PB

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira
Coordenador Substituto do PPGEE

À meus pais Adelina e Napoleão, à meu irmão
Marcos e á minha namorada Denise.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pela disposição, perseverança e saúde para a realização deste trabalho.

Reverencio o Professor Dr. Emerson Giovani Carati pela sua dedicação e pela orientação deste trabalho e, por meio dele, me reporto a toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio incondicional.

Também agradeço ao Professor Dr. Gustavo Weber Denardin por sua orientação que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Miguel Moreto por disponibilizar parte do material utilizado nos ensaios experimentais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo apoio institucional.

A todos os colegas de trabalho gostaria de externar minha satisfação de poder conviver com eles durante a realização deste estudo.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Gostaria de deixar registrado também, o meu agradecimento especial à meus pais Napoleão Maciel e Adelina Maciel bem como a meu irmão Professor Dr. Marcos Euzebio Maciel, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio. E por último, e nem por isso menos importante, agradeço a minha namorada Denise Estraich pelo carinho, amor e compreensão.

Amo ao SENHOR, porque ele ouviu a minha voz e a minha súplica.

(Salmo 116:1. Bíblia Sagrada)

RESUMO

MACIEL, Savio A. Controlador de Demanda e Emulador do Consumidor Residencial para Manutenção do Conforto do Usuário em Smart Grids. 2014, 126f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Neste trabalho é apresentada uma abordagem de controle de demanda para consumidores residenciais de baixa tensão, visando melhoria da eficiência energética em *Smart Grids*. Inicialmente, um emulador de cargas elétricas residenciais é modelado com base na literatura. O emulador é composto pelo modelo de um reservatório de aquecimento de água (*boiler*), o modelo de um aparelho de ar condicionado e também modelos de consumo de iluminação, televisores e uma geladeira. Utilizando o *software Matlab* foi realizada a implementação e simulação do emulador. Os principais algoritmos de controle de demanda são investigados, a fim de verificar o seu desempenho quando aplicados ao conjunto de cargas residenciais. Esses algoritmos normalmente realizam o controle de demanda a partir de um sistema de prioridades. Ainda, a partir dessa análise demonstra-se que estes algoritmos consideram níveis de conforto do usuário, porém não permitem o acionamento de duas ou mais cargas em um mesmo período caso a demanda da residência ultrapasse um limite predeterminado. Portanto, propõem-se um algoritmo de controle de demanda adaptativo que utiliza o método de busca Rosenbrock, com o objetivo de sobrepujar tais limitações. O procedimento proposto realiza a operação das cargas residenciais de forma gradual considerando níveis de prioridade e parâmetros de conforto dos usuários. Demonstra-se através de simulações e experimentos que através do método proposto é possível realizar a ativação de diversas cargas concorrentemente, desde que respeitados os níveis de conforto e de demanda. Para obtenção dos resultados experimentais o controlador de demanda foi implementado em um sistema embarcado e testado com o emulador de cargas elétricas residenciais implementado em uma arquitetura HIL (*Hardware-in-the-loop*). Analisando os resultados, observou-se que o consumo de energia foi o mesmo para todos os cenários simulados sendo que a demanda se manteve abaixo dos limites parametrizados. Porém com o limitador de demanda ativo, se obteve uma redução de até 52% no tempo de aquecimento da água utilizando o controlador de demanda adaptativo, dessa forma o desconforto dos usuários pode ser minimizado.

Palavras-Chave: *Smart Grid*, controlador de demanda, gerenciamento de energia residencial, controlador de busca, eficiência energética, emulador.

ABSTRACT

MACIEL, Savio A. Demand Controller and Emulator of Power Home Consumer for Maintenance of User Comfort in Smart Grids. 2014, 126f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

This work presents an approach to control demand for residential low voltage consumers, aiming to improve energy efficiency in Smart Grids. Initially, an emulator of residential electric loads is modeled based on the literature. The emulator consists of a reservoir for water heating model, the model of an air conditioner and also models of consumption for lighting, televisions and a refrigerator. The implementation and simulation were performed using software Matlab. The demand control algorithms are investigated in order to verify its performance when applied to the set of residential loads. These algorithms typically perform control demand from a system of priorities. Still, from this analysis it demonstrates that these algorithms consider levels of user comfort, but do not allow the drive of two or more loads in the same period of residence if the demand exceeds the limit. Therefore, we propose a control algorithm that uses Rosenbrock search of demand adaptive method, aiming to overcome these limitations. The proposed procedure performs the operation of residential loads gradually considering priority levels and parameters of comfort of users. It is shown through simulations and experiments using the proposed method can perform the activation of several concurrently loads, provided they comply with the limits of comfort and demand. To obtain the experimental results demand the controller was implemented in an embedded system and tested with the emulator residential electrical loads implemented in a HIL (Hardware-in-the-loop) architecture. Analyzing the results, it was observed that the power consumption is the same for all scenarios simulated and demand remained below parametric limits. But with the demand limiter active, we obtained a reduction of up to 52% in heat water using the demand controller adaptive, so the discomfort of the users can be minimized.

Keywords: Smart Grid, demand controller, home energy management, search controller, energy efficiency, emulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de informações e energia em uma <i>Smart Grid</i>	23
Figura 2 - Topologia controle de demanda.....	25
Figura 3 - Estrutura do trabalho.....	28
Figura 4 - Consumo setorial de eletricidade (Total: 375.193 MWh).	30
Figura 5 - Consumo de energia elétrica residencial por nacional e por região.	31
Figura 6 - Curvas de carga horária do consumidor típico da Região da Sul (ano base 2005)..	32
Figura 7 - Consumo das cargas na região sul: (a) Ar condicionado; (b) Aquecimento de água; (c) Televisores; (d) Iluminação; (e) Geladeira.	33
Figura 8 - Modelo do Reservatório de Água.	37
Figura 9 - Temperatura Interna do Reservatório.	38
Figura 10 - Representação em forma de circuito de um ambiente climatizado.	40
Figura 11 - Diagrama de um ambiente condicionado; T_r : Referência de temperatura, T_o : Temperatura externa; T : Temperatura interna, T_s : Temperatura saída do ar condicionado, qs : Fluxo do ar condicionado.....	41
Figura 12 - Modelo de Temperatura Ambiente.	42
Figura 13- Simulação da Temperatura Ambiente.	46
Figura 14 - Simulação da temperatura ambiente com variação da carga térmica.	47
Figura 15 - Modelo de Iluminação, televisores e geladeira.....	48
Figura 16 - Simulação Cargas Instantâneas.....	49
Figura 17 - Modelo de Consumo de Energia Residencial.	50
Figura 18 - Simulação Modelo de consumo de Energia Residencial; (a) Consumo total por carga; (b) Consumo total da residência.	51
Figura 19 - Fluxograma da estratégia de operação de cargas e do controle de demanda.....	56
Figura 20 - Fluxograma do CDBP.....	57
Figura 21 - Modelo <i>Simulink</i> do Controlador de Demanda.....	58
Figura 22 - Bloco Residência.	60
Figura 23 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, sem limitador de demanda utilizando o CDBP, primeiras 7 horas de simulação.....	61
Figura 24 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, sem limitador de demanda utilizando o CDBP, a partir das 18h.....	63
Figura 25 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDBP, primeiras 7 horas de simulação.....	64

Figura 26 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDBP, a partir das 18h.....	65
Figura 27 - Tempo para aquecimento de água no CDBP.....	66
Figura 28 - Tempo de acionamento do ar condicionado.....	66
Figura 29 - Consumo de energia CDBP.....	67
Figura 30 - Busca baseada no método Rosenbrock.....	70
Figura 31 - Fluxograma da estratégia de operação de cargas do CDA.....	72
Figura 32 - Fluxograma Função do CDA.....	73
Figura 33 - Modelo Simulink do CDA.....	75
Figura 34 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDA, primeiras 7 horas de simulação.....	76
Figura 35 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDA, a partir das 18h.....	78
Figura 36 - Tempo para aquecimento de água no CDA.....	79
Figura 37 - Consumo de energia CDA.....	80
Figura 38 – Degraus de acionamento para o aquecimento de água e do ar condicionado.....	81
Figura 39 – Fluxograma do CDAP.....	84
Figura 40 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganhos de carga iguais, primeiras 7 horas de simulação.....	85
Figura 41 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganhos de carga iguais, a partir das 18h.....	86
Figura 42 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o aquecimento de água, primeiras 7h de simulação.....	87
Figura 43 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o aquecimento de água, a partir das 18h.....	88
Figura 44 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o ar condicionado, primeiras 7h de simulação.....	89
Figura 45 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o ar condicionado, a partir das 18h.....	90

Figura 46 – Comparativo do tempo de acionamento do aquecimento de água e do ar condicionado para diferentes ganhos de carga.	91
Figura 47 - Temperaturas com diferentes ganhos de carga no distúrbio a parti das 06h	92
Figura 48 – Consumo de energia CDAP	93
Figura 49 - Comparativo entre os controladores para o tempo de aquecimento de água no primeiro acionamento.	94
Figura 50 - Comparativo entre os controladores para o tempo de aquecimento de água no segundo acionamento.	94
Figura 51 - Arquitetura HIL.	97
Figura 52 - Fluxograma emulador de consumo residencial.	100
Figura 53 - Plataforma de ensaios, arquitetura HIL.	103
Figura 54 - Diagrama físico plataforma de ensaio.	105
Figura 55 - Interface gráfica parâmetros de controle.	106
Figura 56 - Interface gráfica parametrização de <i>setpoints</i>	107
Figura 57 - Comparação entre resultados simulados e experimentais do modelo de aquecimento de água.	108
Figura 58 - Resultado do osciloscópio para o modelo de aquecimento de água.	108
Figura 59 - Comparação entre resultados simulados e experimentais do modelo de temperatura ambiente.	109
Figura 60 - Resultado do osciloscópio para o modelo de temperatura ambiente.....	110
Figura 61 - Resultados experimentais do CDA sem limitador de demanda. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.....	111
Figura 62 - Resultados experimentais do CDA com limitador de demanda em 5 kW. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.....	113
Figura 63 - Resultados experimentais do CDA com limitador de demanda em 5 kW, acionamento de CI. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.....	114
Figura 64 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.	116
Figura 65 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. Ganho de carga 0,8 para aquecimento de água e ganho de carga 0.2 para o ar condicionado (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.	117

Figura 66 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. Ganho de carga 0,2 para aquecimento de água e ganho de carga 0.8 para o ar condicionado (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência. 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores Utilizados na Simulação do Modelo do Reservatório de Água.	37
Tabela 2 - Valores Utilizados na Simulação do Modelo de Temperatura Ambiente.....	45
Tabela 3 - Prioridades e Níveis de Conforto do Usuário.....	54
Tabela 4 - Parametrização da simulação do controlador de demanda.....	61
Tabela 5 - Valores de interação do algoritmo de busca Rosenbrock.....	71

LISTA DE SIGLAS

ADC	Conversor analógico digital (<i>Analog-to-digital Converter</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CI	Cargas Instantâneas
DAC	Conversor digital analógico (<i>Digital-to-analog Converter</i>)
HIL	<i>Hardware in the Loop</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$P_f(t)$	Potência fornecida pela resistência elétrica (W)
$P_a(t)$	Calor perdido para o ambiente (W)
r_o	Densidade do fluido (kg/m ³)
C_p	Calor específico do fluido (cal/kg °C)
$Q(t)$	Vazão de entrada e saída do reservatório (ml/min)
$T_e(t)$	Temperatura de entrada do fluido no tanque (°C)
$T_s(t)$	Temperatura de saída do fluido do tanque (°C)
V	Volume do fluido no interior do tanque (m ³)
P_a	Perdas Térmicas (W/°C)
U	Coefficiente Global de perdas (W/°C)
T_s	Temperatura interior do reservatório (°C)
T_a	Temperatura externa (°C)
P_a	Temperatura do ar ambiente (°C)
t	Intervalo de tempo
V_e	Tensão de entrada (Temperatura externa) (°C)
R_c	Resistência térmica
C_t	Capacidade térmica
I_c	Fonte de calor
I_{ac}	Ação do ar condicionado
S	Chaveamento ar condicionado
Δt	Intervalo de tempo
G_i	Ganho de calor do ambiente (Btu/h)
Δc	Energia para mudar temperatura do ambiente em 1 °F
C_{HVAC}	Capacidade térmica do aparelho de ar condicionado (Btu/h)
$w_{AC,i}$	Estado do ar condicionado (Ligado/Desligado)
A_{parede}	Área das paredes (ft ²)

A_{teto}	Área do teto (ft ²)
$A_{janelas}$	Área das janelas (ft ²)
R_{parede}	Resistencia térmica das paredes (°F ft ² h/Btu)
R_{teto}	Resistencia térmica do teto (°F ft ² h/Btu)
$R_{janelas}$	Resistencia térmica das janelas (°F ft ² h/Btu)
η_{ac}	Trocas de ar (1/h)
V_{casa}	Volume do ambiente (ft ³)
T_{out}	Temperatura externa (°F)
SHGC	coeficiente de ganho de calor das janelas
H_{solar}	ganho térmico por radiação solar (W/m ²)
H_p	ganho térmico por pessoa (Btu/h)
C_{ar}	Calor específico do ar (Btu/ft ³ °F)
T_i	Temperatura interna (°C)
T_o	Temperatura externa(°C)
C	Capacidade térmica de um ambiente condicionado (kJ/°C)
η	Transmitância das paredes, chão e teto (kW/°C)
ρ	Densidade do ar (kg/m ³)
C_p	Calor específico do ar (kJ/kg°C)
q_s	Fluxo de ar (m ³ /s)
T_{sa}	Temperatura de saída do ar condicionado (°C)
L	Carga térmica interna (kW)
Q	Ganho térmico por infiltração (kW)
η_{pp}	Transmitância paredes e piso (kW)
η_t	Transmitância teto (kW)
V_i	Vazão por infiltração (l/s)
Δt_{ei}	Diferença de temperatura interna e externa para infiltração (°C)
PC_{IL}	Potência total consumida da iluminação (kW)
P_{IL}	Potencia nominal unitária das lâmpadas (W)

Q_{IL}	Quantidade de lâmpadas
E_{IL}	Estado das Lâmpadas (0:Desligado; 1:Ligado)
PC_{TV}	Potência total consumida dos televisores (kW)
P_{TV}	Potencia nominal unitária dos televisores (W)
Q_{TV}	Quantidade de televisores
E_{TV}	Estado dos televisores (0:Desligado; 1:Ligado)
PC_{AC}	Potência consumida do ar condicionado (kW)
P_{AC}	Potência nominal do ar condicionado (kW)
DR_{AC}	Sinal do controlador de demanda (0: Desligado; 1: Ligado)
PC_{AQ}	Potência consumida do aquecimento de água (kW)
P_{AQ}	Potência nominal da resistência de aquecimento da água (kW)
DR_{AQ}	Sinal do controlador de demanda (0: Desligado; 1: Ligado)
PTC_{RES}	Potência total consumida da residência (kW)
PC_{IL}	Potência total consumida da iluminação (kW)
PC_{TV}	Potência total consumida dos televisores (kW)
PC_{AC}	Potência consumida do ar condicionado (kW)
PAC_{AQ}	Potência consumida do aquecimento de água (kW)
$E_{AC,n}$	Estado do ar condicionado no intervalo de tempo n
$T_{AMB,n}$	Temperatura ambiente no intervalo de tempo n (°C)
$T_{setAC,n}$	Ponto de ajuste (setpoint) da temperatura no intervalo de tempo n.(°C)
ΔT_{AC}	Tolerância de temperatura (°C)
$E_{AQ,n}$	Estado do aquecimento de água no intervalo de tempo n
$T_{INT,n}$	Temperatura interna da água no intervalo de tempo n (°C)
$T_{setAQ,n}$	Ponto de ajuste (setpoint) da temperatura no intervalo de tempo n.(°C)
ΔT_{AQ}	Tolerância de temperatura (°C)
$U(n)$	Sinal de controle de demanda
$\Delta U(n-1)$	$U(n-1) - U(n-2)$

k	Direção da busca
DR	Demanda total de energia elétrica da residência (kW)
LDI	Limite de Demanda Inferior
LDS	Limite de Demanda Superior (kW)
V_{oS}	Sinal de saída do filtro
V_{iS}	Sinal de entrada do filtro
W_o	Frequência de corte
ζ	Coefficiente de amortecimento
$T_s(t)$	Temperatura de saída do fluido do tanque (°C)
S_{ADC1}	Valor de saída do ADC1 (V)
S_{ADC2}	Valor de saída do ADC2 (V)
$ADC1_ch0$	Valor convertido pelo ADC1 canal 0
DAC_1	Valor para conversão do DAC1
$ADC1_ch1$	Valor convertido pelo ADC1 canal 1
DAC_2	Valor para conversão do DAC2
$ErAg$	Erro de temperatura da água
GAg	Ganho de carga da água
$ErAr$	Erro de temperatura do Ar
GAr	Ganho de carga do ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.2 OBJETIVOS	27
1.2.1 Objetivo Geral	27
1.2.2 Objetivos Específicos	27
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CARGAS RESIDENCIAIS.....	29
2.1 PERFIS DE DEMANDA DE ENERGIA DE CARGAS ELÉTRICAS RESIDENCIAIS NO BRASIL	29
2.2 MODELO DO RESERVATÓRIO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	35
2.2.1 Simulação Do Modelo Do Reservatório Para Aquecimento De Água.....	36
2.3 MODELO TÉRMICO DE UM AMBIENTE “CLIMATIZADO” POR AR CONDICIONADO	39
2.3.1 Simulação de um Modelo Térmico de um Ambiente “Climatizado” por Ar Condicionado.....	42
2.4 MODELO DE CARGAS INSTANTÂNEAS RESIDENCIAIS (CI)	47
2.4.1 Simulação de Cargas Instantâneas Residenciais	48
2.5 MODELO DE CONSUMIDOR DE ENERGIA RESIDENCIAL.....	49
2.5.1 Simulação do Modelo de Consumo de Energia Residencial.....	50
2.6 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	52
3 CONTROLADOR DE DEMANDA BASEADO EM PRIORIDADES (CDBP)	53
3.1 PRIORIDADE DAS CARGAS E PARÂMETROS DE PREFERÊNCIA	53
3.2 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS CARGAS	54
3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE DEMANDA	55
3.4 SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR DE DEMANDA BASEADO EM PRIORIDADES (CDBP).....	58
3.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	68
4 CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO (CDA)	69
4.1 PRIORIDADE DAS CARGAS E PARÂMETROS DE PREFERÊNCIA	71
4.2 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS CARGAS	71
4.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE DEMANDA	72
4.5 SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO (CDA).....	74
4.6 CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO PONDERADO (CDAP).....	80
4.6.1 Simulação do CDAP.....	84
4.7 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	94
5 EMULADOR HIL DE CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL.....	96
5.1 PLATAFORMA HIL.....	96
5.2 EMULADOR HIL DE CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL	98
5.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	101
6 PLATAFORMA DE ENSAIOS E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	102
6.1 PLATAFORMA DE ENSAIOS	102
6.2 INTERFACE GRÁFICA	106
6.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO EMULADOR DE CONSUMO RESIDENCIAL.....	107
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CDA	110
6.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CDAP	115
6.6 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	119

7 CONCLUSÕES.....	120
REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental para a qualidade de vida na sociedade moderna. Embora a energia seja consumida em sua grande parte em cidades de grande porte, a mesma é também gerada e consumida em localizações remotas. Neste contexto, as linhas de transmissão e distribuição são utilizadas para interligar unidades geradoras, estações transformadoras e consumidores. Nos últimos anos, a transmissão e distribuição de energia elétrica têm sido reestruturadas a fim de atender a crescente demanda de energia do País. De acordo com estimativas, a previsão de crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil será de 4,5% ao ano na próxima década. Em 2011 o consumo de energia elétrica foi de 472 mil GWh e deverá atingir o valor de 736 mil GWh em 2021 (MACHADO, 2012).

Atualmente o sistema elétrico de potência está superdimensionado em função do horário de ponta que compreende um período do dia especificado pela concessionária de três horas diárias consecutivas (ABDO, 2001), em que a demanda de energia elétrica apresenta um valor muito elevado. Os horários de pico compreendem um período crítico de demanda de energia e podem variar dependendo do consumidor. Por exemplo, em uma universidade o horário de pico pode ocorrer entre 13h00m e 14h00m. Já em uma microempresa o horário de pico pode ocorrer entre as 08h00m e 09h00m. Em razão dos diferentes padrões de demanda ao longo do dia, a ANEEL aprovou em 22/11/2011 a resolução normativa – REN n° 464 que define a metodologia e os procedimentos gerais de definição da nova estrutura tarifária das concessionárias de distribuição (ANEEL, 2011). A resolução prevê a tarifação diferenciada ao longo do dia para consumidores de baixa tensão. De segunda a sexta-feira será aplicada uma tarifa mais baixa na maioria das horas do dia, e outra mais alta nos horários em que o demanda de energia atingir um valor máximo. No início da noite será aplicada uma tarifação intermediária. Segundo a ANEEL, a proposta da tarifação diferenciada tem como objetivo estimular o consumo em horários de baixa demanda, dessa forma é possível à diminuição do valor da fatura no fim do mês e a necessidade de expansão da rede da distribuidora para atendimento do horário de ponta (ANEEL, 2011).

A fim de atender a crescente demanda de energia elétrica, diversas ações podem ser tomadas e uma das mais relevantes é promover a melhora da eficiência energética do sistema elétrico de potência, através da implementação de recursos tecnológicos, desde a geração até os consumidores finais. Tais implementações também são conhecidas como *Smart Grid*.

A *Smart Grid*, ou rede inteligente, consiste na modernização do sistema elétrico de potência a fim de permitir um fluxo bidirecional de informação entre os usuários,

concessionária, subestações e equipamentos nas redes de transmissão (XUE-SONG, LI-QIANG e YOU-JIE, 2010). Na prática, a *Smart Grid* envolve a instalação de dispositivos eletrônicos nas linhas de transmissão e distribuição de energia bem como nos consumidores finais. Equipamentos como religadores automáticos, medidores de energia inteligentes (*Smart Meters*), controladores de transformadores, analisadores de energia e controladores de demanda poderão ser utilizados na *Smart Grid* (OLIVEIRA, 2011).

A *Smart Grid* pode ser dividida em três níveis: nível de potência, nível de comunicação e controle, e nível de aplicação. O nível de potência é formado pela geração, transmissão e distribuição de energia. O nível de comunicação e controle é constituído por uma rede que permite a troca de informação entre os diversos dispositivos utilizados no nível de potência. Atualmente, o monitoramento e controle de alguns segmentos do sistema de potência, como em estações geradoras e subestações, já é bem difundido. Porém, o monitoramento dos consumidores finais em baixa tensão é pouco realizado.

Embora pesquisas estejam sendo desenvolvidas em diferentes níveis da *Smart Grid*, a implementação de novas tecnologias no consumidor final pode apresentar melhoras significativas na eficiência energética do sistema elétrico de potência, principalmente ao que se refere ao controle de demanda. A utilização de controladores de demanda torna possível limitar a demanda de energia em períodos específicos do dia, como o horário de ponta e de pico. Dessa forma pode-se diminuir os custos da energia para o consumidor final e o risco de interrupções de fornecimento (*blackouts*) também pode ser minimizado.

Na Figura 1 é possível visualizar o fluxo de informações e de energia utilizando controladores de demanda em uma arquitetura *Smart Grid*. Nesta configuração é possível realizar o controle de todo o sistema elétrico de potência, desde a geração até o consumo de energia dos clientes de baixa tensão (RAHIMI e IPAKCHI, 2010).

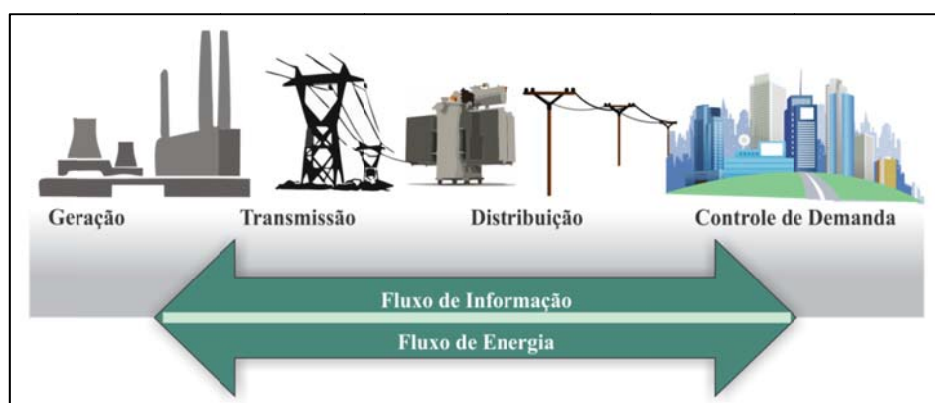


Figura 1 - Fluxo de informações e energia em uma *Smart Grid*.
 Fonte: (RAHIMI e IPAKCHI, 2010).

Diversos projetos visando o controle de demanda em *Smart Grid* foram implementados e apresentaram grande economia de energia. Um exemplo de aplicação é informar ao usuário em tempo real a quantidade e o custo da energia consumida pelos aparelhos em uma residência. Em alguns projetos essa aplicação chegou a uma economia de 6,5% e 11,3% de energia (COMPACT, 2010). Outro exemplo é a utilização de termostatos inteligentes para controle de temperatura. Em um caso de aplicação que desde 2009 instalou mais de 86.000 termostatos, foi possível reduzir a demanda de energia em 90MW durante o horário de ponta (ENERGY, 2013).

O controlador de demanda é um dispositivo que tem por objetivo manter a demanda abaixo de um valor limite pré-estabelecido. Os controladores de demanda podem ser classificados como convencionais ou inteligentes. Os controladores convencionais são dispositivos eletromecânicos que operam apenas em dois estados (ligado ou desligado) e podem atuar de forma prematura ou intermitente. Os controladores inteligentes são dispositivos eletrônicos programáveis constituídos por algoritmos de controle que realizam o acionamento ou desativação de cargas considerando diversas características do sistema bem como parâmetros de configuração dos usuários (OZUR, PEREIRA e CORREA, 2011). Nos controladores inteligentes podem ser parametrizados níveis de conforto dos usuários e priorização de cargas. Ainda, podem ser utilizadas interfaces gráficas que permitem interação do usuário com o sistema. Neste tipo de controlador o limite de demanda pode ser estabelecido pelo consumidor final ou pela concessionária em função das demandas ao longo do dia. Os controladores de demanda inteligentes podem operar de forma local ou em rede. De forma local o limite de demanda pode ser configurado pelo usuário e operando em rede o controlador de demanda pode ser parametrizado pelo usuário e também pela concessionária. Apesar do controle automático de demanda no meio industrial já ser difundido, controladores de demanda residenciais ainda são novidade para consumidores de baixa tensão. Na Figura 2 apresenta-se uma possível topologia para a implementação do controlador de demanda em que as cargas são monitoradas por medidores com comunicação sem fio. As informações lidas pelos medidores são enviadas para o controlador de demanda que realiza a operação das cargas na residência. Ainda, é possível observar na Figura 2 uma estrutura de comunicação do controlador de demanda com a concessionária, que pode, ao longo do dia, ativar ou não o limitador de demanda.

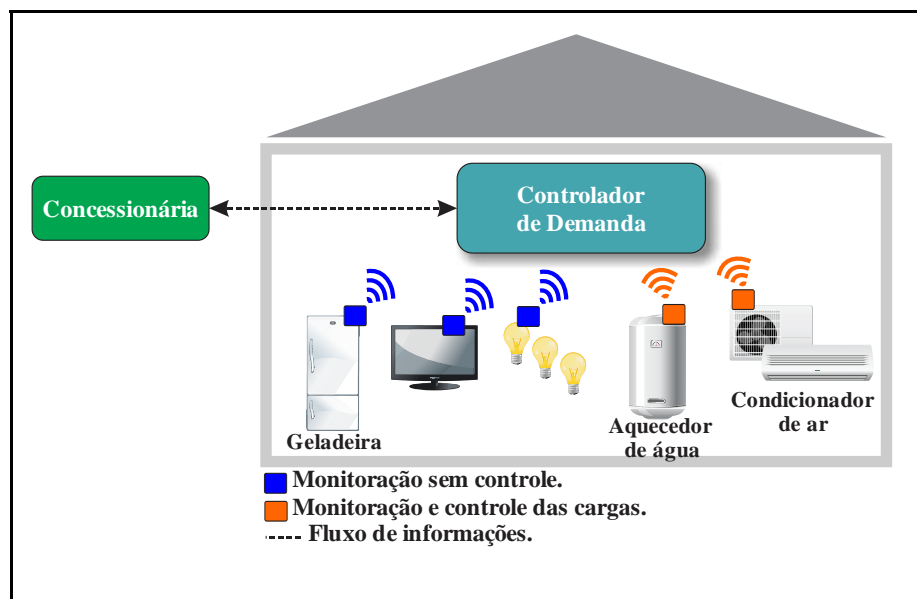


Figura 2 - Topologia controle de demanda.
Fonte: Aatoria própria.

Na Figura 2 são apresentados dois grupos distintos de cargas. O primeiro grupo é formado por cargas como televisores, iluminação, geladeira e tomadas de fornecimento de energia que são apenas monitoradas pelo controlador de demanda. O segundo grupo é formado por cargas como aquecedores de água e aparelhos de ar condicionado. Estas cargas são monitoradas e podem ser acionadas ou desativadas pelo controlador de demanda. Ainda, podem ter acionamento gerenciado ao longo do dia de forma a evitar que a demanda da residência ultrapasse o limite em determinados períodos.

Cada usuário da rede elétrica apresenta um perfil de consumo residencial que se difere para cada região do Brasil. Em função dos hábitos culturais e condições climáticas, a utilização de alguns eletrodomésticos é maior em algumas regiões do que em outras. Como exemplo pode-se citar o ar condicionado e o aquecimento de água. As regiões norte e sul possuem os maiores índices de consumo de energia elétrica dos aparelhos de ar condicionado, porém se diferem quanto ao aquecimento de água, em que a região norte apresenta o menor índice de todo o País e a região sul fica em terceiro lugar de consumo, menor que a região centro-oeste e sudeste. Em razão dessas características, o algoritmo utilizado no controlador de demanda deve possuir funções de parametrização que permitam diferentes configurações, considerando a especificidade de cada região do País.

Diferentes algoritmos podem ser utilizados para o controle de demanda. Em (PIPATTANASOMPORN, KUZLU e RAHMAN, 2012) é apresentado um algoritmo de gerenciamento de energia residencial que opera em função da prioridade das cargas. Assim

cargas de baixa prioridade são desligadas primeiro para evitar que o limite de demanda seja ultrapassado. No entanto, caso seja utilizado um baixo valor para o limite de demanda neste algoritmo, o conforto do usuário pode ser prejudicado. Ainda em (HAN, CHOI, *et al.*, 2011) foi desenvolvido um sistema de gerenciamento de energia residencial, que possibilita a comparação do consumo entre as cargas e um valor de referência. Segundo os autores através da comparação é possível se analisar a eficiência energética do eletrodoméstico e dessa forma pode-se alterar o padrão de uso ou realizar a substituição por um aparelho mais econômico. Como resultado o sistema proposto pode contribuir para a redução da demanda de energia em uma residência. Os valores de consumo e de comparação foram apresentados através de uma interface em um portal e a medição das aplicações foi realizada utilizando uma rede sem fio ZigBee. Em (LI, CHUNG, *et al.*, 2011) é apresentado um sistema de gerenciamento de energia baseado em um algoritmo que realiza o acionamento das cargas de forma agendada ao longo do dia. Segundo os autores a utilização das cargas pelo usuário é caracterizada por uma sequência de acionamentos ao longo do dia. Algumas cargas como um refrigerador, podem ser consideradas persistentes e consomem energia durante todo o período do dia, enquanto outras cargas como o aquecimento de água podem ter seu acionamento realizado em diferentes períodos do dia. O sistema de gerenciamento proposto por (LI, CHUNG, *et al.*, 2011) foi aplicado em 1000 residências e como resultado obteve uma redução total de 27,6 % de demanda durante o horário de ponta.

Dentro do contexto apresentado acima, neste trabalho são apresentadas a proposta, validação por simulações e a implementação experimental de um algoritmo de controle de demanda adaptativo. A principal característica do algoritmo proposto neste trabalho é a possibilidade de manter a demanda de energia elétrica da residência abaixo de um determinado limite, respeitando níveis de conforto dos usuários em razão da possibilidade da operação de mais de uma carga durante um mesmo período. Outra contribuição deste trabalho é a implementação de um emulador de consumo de energia elétrica de consumidores residenciais, constituído pela modelagem de cargas residenciais como ar condicionado e aquecimento de água, lâmpadas, televisores e geladeira. A implementação experimental foi realizada utilizando o conceito HIL (*Hardware-in-the-loop*), formada por duas plataformas embarcadas. Este conceito permite, a partir de uma arquitetura embarcada, gerar sinais analógicos e de tempo contínuo correspondentes as variáveis de uma planta e que podem ser utilizados para testar uma plataforma de controle. Assim, na primeira plataforma foi implementado o emulador de consumo de energia residencial e na segunda, os algoritmos de

controle de demanda. Utilizando a arquitetura HIL foram realizados ensaios e obtidos os resultados experimentais para o controlador de demanda.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Desenvolver, analisar e validar experimentalmente estratégias de controle de demanda em uma arquitetura Smart Grid que diminuam a demanda máxima de energia elétrica do consumidor residencial.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar e modelar os perfis de consumo de cargas elétricas residenciais no Brasil;
- Analisar através de simulações computacionais, as características de algoritmos de controle de demanda da literatura com foco em consumidores residenciais;
- Propor e analisar novas técnicas de controle de demanda visando diminuição da demanda máxima em consumidores residenciais;
- Desenvolver uma plataforma de ensaios experimentais baseada em uma arquitetura HIL (*Hardware-in-the-loop*);
- Validar experimentalmente as técnicas analisadas e as técnicas propostas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado de forma a permitir leitura por capítulos conforme apresentado no diagrama da Figura 3, onde os capítulos versam sobre os seguintes temas:

- No primeiro capítulo foi apresentada a introdução com as motivações para o desenvolvimento do trabalho proposto e objetivos;
- No segundo capítulo é analisado o perfil de cargas elétricas residenciais do Brasil bem como é apresentada a modelagem e simulação de um emulador de consumo de energia residencial;

- No terceiro capítulo apresenta-se uma revisão da literatura em que um algoritmo de controle de demanda da literatura é implementado e simulado;
- No quarto capítulo apresenta-se a implementação e simulação de um novo algoritmo de controle de demanda do tipo adaptativo;
- No quinto capítulo é descrito a implementação de um emulador de consumo de energia elétrica residencial utilizando uma arquitetura HIL;
- No sexto capítulo apresenta-se a plataforma de ensaios e os resultados para validação experimental;
- No sétimo capítulo estão descritas as conclusões do trabalho, bem como contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

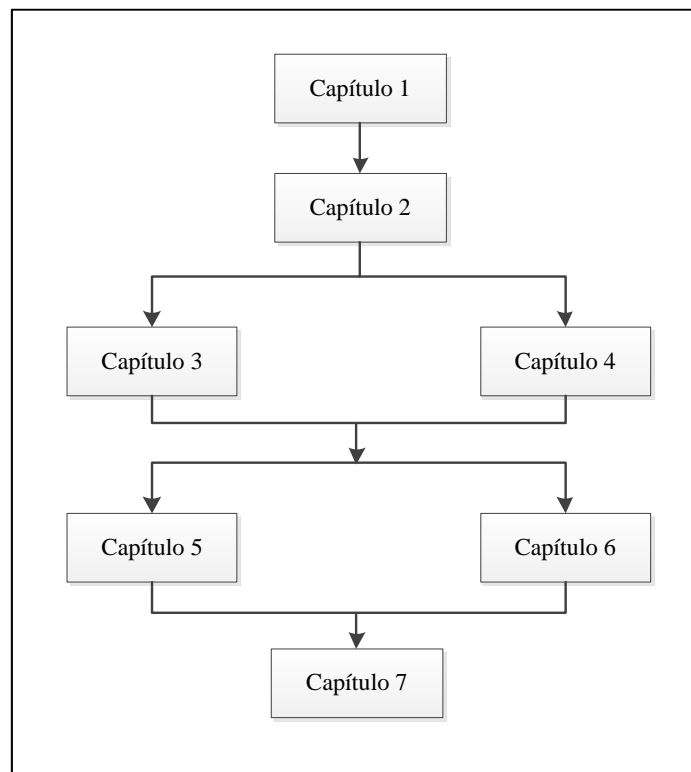


Figura 3 - Estrutura do trabalho.
Fonte: Autoria Própria.

2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CARGAS RESIDENCIAIS

Neste capítulo apresentam-se inicialmente os perfis de consumo de cargas elétricas residenciais no Brasil. A seguir, os modelos matemáticos de cargas elétricas tradicionais existentes em residências, bem com sua simulação no *software Matlab Simulink* são apresentados. Tais modelos são necessários para a análise de algoritmos de controle de demanda, pois representam a dinâmica destas cargas quando submetidas a ações de controle e distúrbios externos. Inicialmente será introduzido o modelo e simulação de um reservatório para aquecimento de água do tipo *boiler*. Em seguida é apresentado o modelo e simulação da temperatura ambiente em uma residência utilizando um ar condicionado. No final do capítulo são apresentados os modelos e a simulação de cargas elétricas residenciais.

2.1 PERFIS DE DEMANDA DE ENERGIA DE CARGAS ELÉTRICAS RESIDENCIAIS NO BRASIL

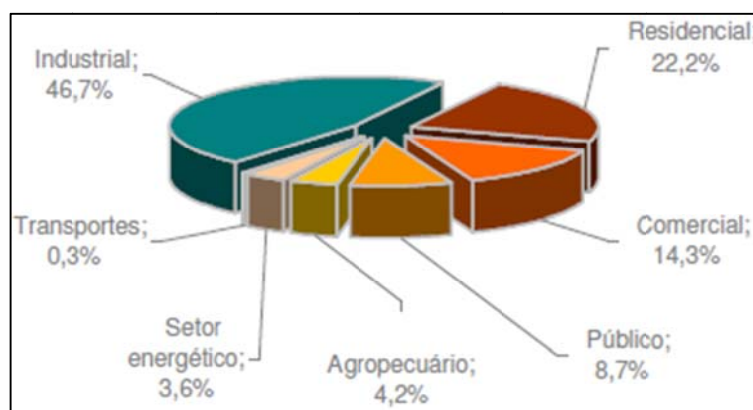
No decorrer das últimas décadas as mudanças econômicas que ocorreram no País influenciaram na demanda de energia elétrica residencial. Uma das mudanças mais significativas ocorreu em 1994 com a introdução do plano real. A redução da inflação e o crédito estimulado favorecido pelos longos financiamentos e prazos, permitiram grande aumento no consumo de produtos duráveis principalmente eletrodomésticos. Este aumento de consumo conseqüentemente refletiu em aumento na demanda de energia elétrica. Embora, até 1994 o consumo de energia elétrica residencial estava apresentando pequena queda, após a introdução do plano real entre os anos de 1994 e 1995 ocorreu aumento de 33% (FALCO, 2010). Nos anos seguintes o consumo continuou aumentando, atingindo em 2011 o valor de 111,971 GWh (LOBÃO, 2011).

Além da introdução do plano real, um conjunto de fatores também influenciou ao longo dos últimos anos no aumento da demanda de energia elétrica residencial (PROCEL, 2007), como:

- Transformação da sociedade industrial para a sociedade de informação e comunicação, possibilitando o desenvolvimento de trabalhos em domicílio por meio de computadores;
- Aumento do índice de desemprego formal, que estimulou a transformação das residências em microempresas;

- Disponibilidade e facilidade na aquisição de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos a fim de se aumentar o conforto e lazer residencial;
- Aumento da permanência das pessoas em suas residências em função da falta de segurança, mais especificamente em grandes centros urbanos;
- Incorporação de novos consumidores em função do aumento e universalização dos serviços de fornecimento de energia elétrica.

No contexto nacional, o consumo de energia elétrica residencial apresenta o segundo maior valor comparado aos outros setores apresentados na Figura 4. O Balanço Energético Nacional – BEM/2006 com ano base de 2005, indica que a demanda apresentou um crescimento de 6,0%.



**Figura 4 - Consumo setorial de eletricidade (Total: 375.193 MWh).
Fonte: (PROCEL, 2007).**

Com o objetivo de quantificar a posse e a utilização de equipamentos elétricos em uma residência, a PUC-Rio juntamente com o Departamento de Planejamento e Estudo de conservação de Energia (DPS) da Eletrobrás, elaboraram um relatório chamado de Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso (PPH). O relatório foi desenvolvido mediante a pesquisa de campo através de questionários aplicados em 1988, 1997 e 2005. A última pesquisa realizada em 2005 contemplou 16 estados e o Distrito Federal com a participação de 21 empresas de energia (PROCEL, 2007).

No âmbito nacional o PPH indicou que o aquecimento de água apresenta o maior índice de consumo de energia (24%), em segundo lugar ficou a geladeira com 22% e em terceiro lugar os aparelhos de ar condicionado com 20,0% do consumo total. Esses valores divergem em relação às regiões do País, pois nas regiões Norte e Sul os aparelhos de ar condicionado possuem o índice de maior consumo com respectivamente de 40% e 32%,

sendo que na região sudeste o ar condicionado é o menos utilizado com valor de 11%. O aquecimento de água fica em primeiro lugar e é a carga de maior consumo nas regiões Centro-Oeste com 28% e Sudeste com 26%. Já na região Norte, o aquecimento de água é a carga de menor consumo entre as cargas analisadas, com total de 2%. Na região Sul, a mesma possui o consumo em torno de 25%, ficando em segundo lugar. Na Figura 5 é apresentado o consumo dos principais eletrodomésticos residências em nível nacional e por região.

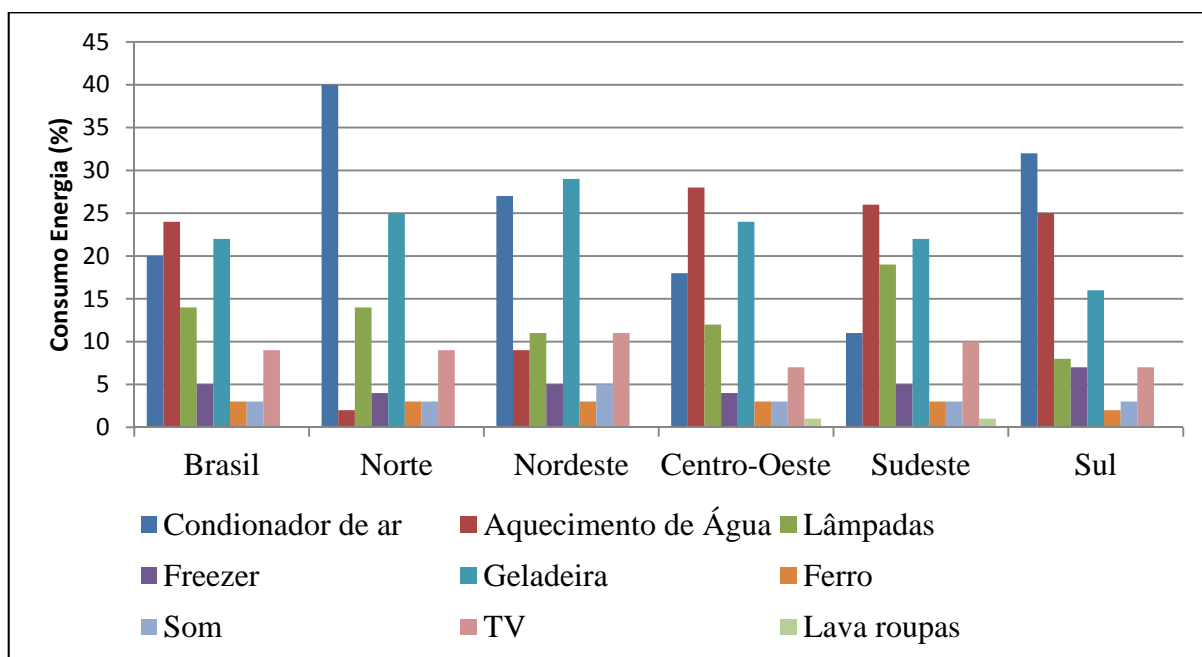


Figura 5 - Consumo de energia elétrica residencial por nacional e por região.

Fonte: (PROCEL, 2007).

Em função das características climáticas e hábitos regionais, percebe-se uma significativa diferença no consumo de energia elétrica dos diferentes equipamentos utilizados em uma residência. Considerando a região Sul, observa-se que o ar condicionado, o aquecimento de água, geladeira e as lâmpadas possuem os maiores índices de consumo em relação às demais cargas residenciais.

Utilizando o simulador SINPHA - Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos (PROCEL, 2007) foram traçadas curvas de carga horária do consumidor típico da Região da Sul (ano base 2005) para o ar condicionado, aquecimento de água (chuveiro), televisores, iluminação e geladeira. Verificando o resultado obtido na Figura 6, é possível observar que nos horários entre 05h00m a 10h00m e entre 17h00m a 22h00m ocorrem os maiores picos de consumo.

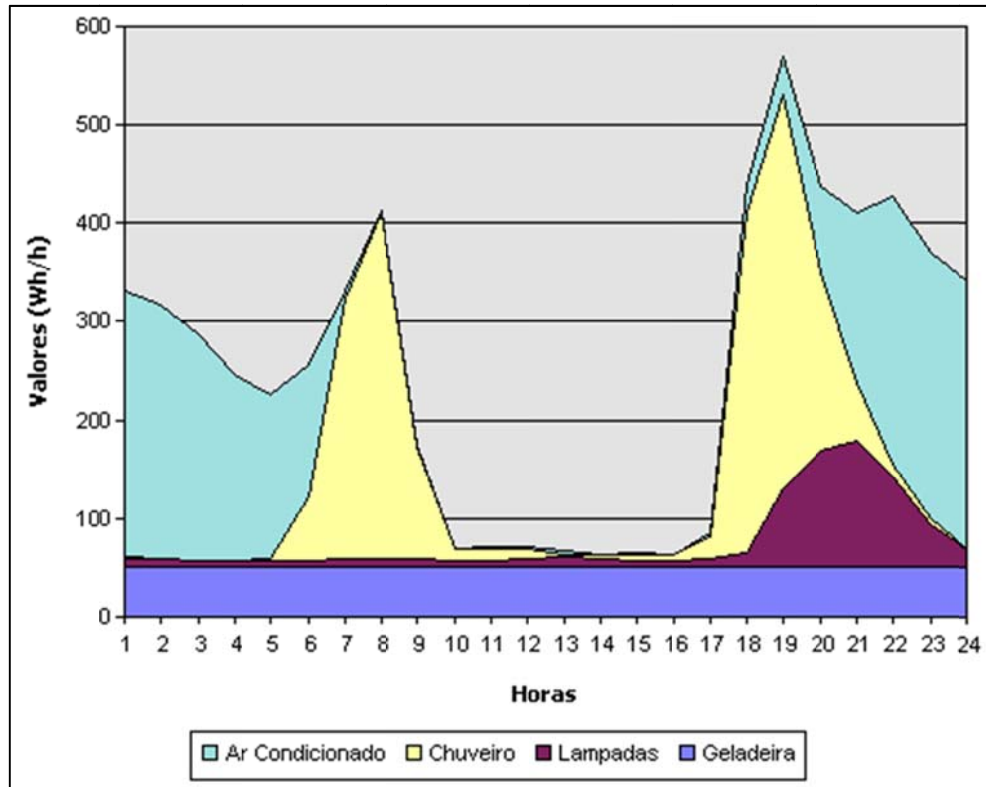


Figura 6 - Curvas de carga horária do consumidor típico da Região da Sul (ano base 2005).

Fonte: (PROCEL, 2007)

Na Figura 7 indica-se o consumo das cargas na região sul de forma individual. É possível observar na Figura 7a que o ar condicionado tem um consumo mais elevado no período da noite com início as 17h00m até as 07h00m. O aquecimento de água na Figura 7b apresenta dois picos de consumo mais elevados que são das 05h00m a 10h00m e entre 17h00 e 21h00m. Os televisores e iluminação tiveram maiores níveis de consumo entre 17h00m e 24h00m e a geladeira apresenta um consumo praticamente constante ao longo do dia.

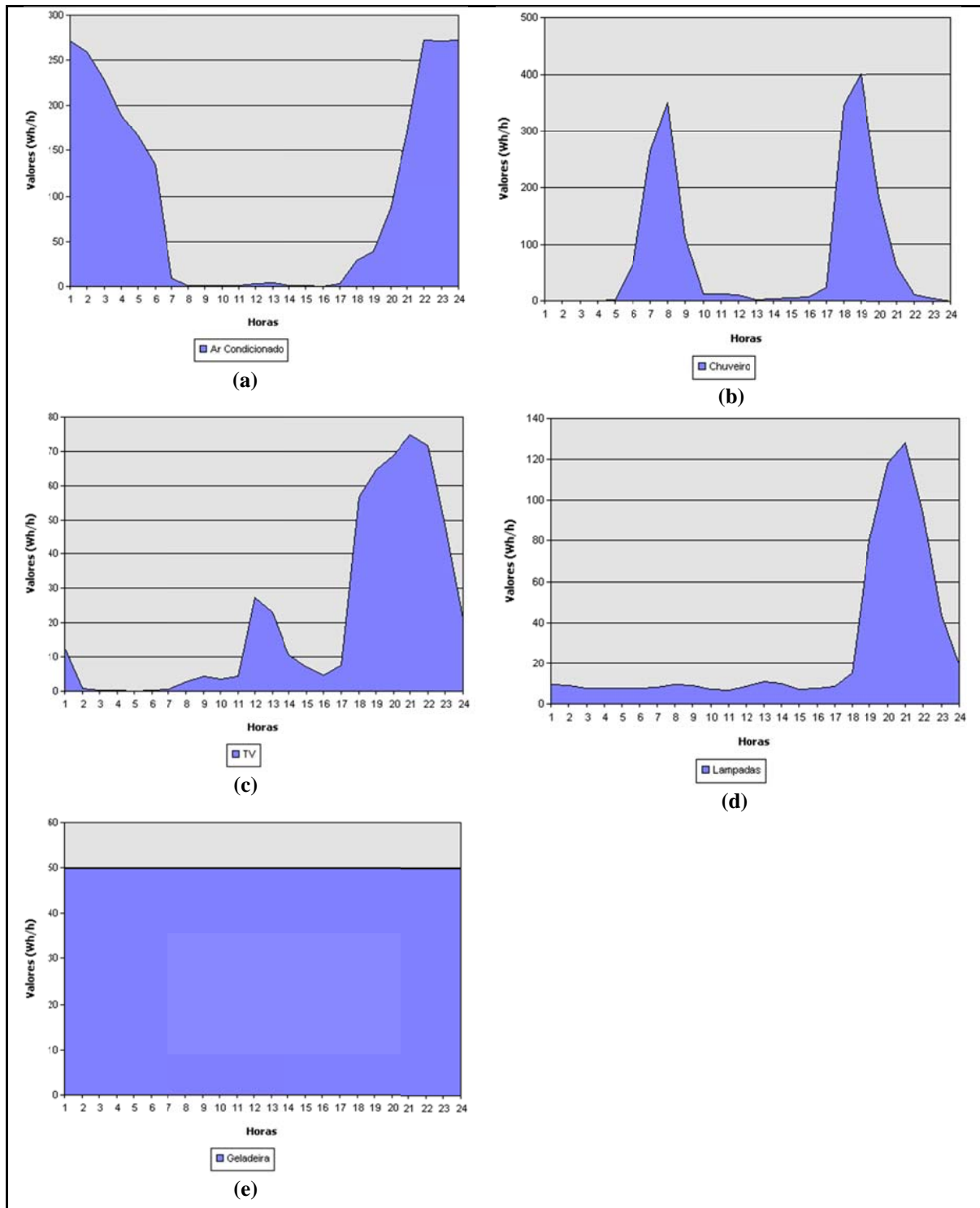


Figura 7 - Consumo das cargas na região sul: (a) Ar condicionado; (b) Aquecimento de água; (c) Televisores; (d) Iluminação; (e) Geladeira.
Fonte: (PROCEL, 2007)

Observa-se na Figura 6 e Figura 7 a existência de alguns períodos em que todas as cargas são ativadas concorrentemente resultando em elevado nível de demanda na residência. A utilização de energia por grande número de usuários com mesmo perfil resulta em uma grande demanda de energia em períodos específicos do dia. Tais períodos são atendidos pela

concessionária, que fornece elevados níveis de energia somente nestes momentos, a fim de suprir a demanda do usuário. Os gráficos apresentados nas Figura 6 e Figura 7 foram gerados utilizando o simulador SINPHA disponibilizado pela PROCEL que chama o aquecimento de água como chuveiro.

Cargas como o aquecimento de água e o aparelho de ar condicionado podem ser gerenciadas ao longo do dia de forma a evitar picos de demanda. O aquecimento de água pode ser realizado nos períodos da noite e em períodos de baixa demanda de energia. O ar condicionado também pode ser acionado em intervalos de baixa demanda da residência. Ambas as cargas podem ser acionadas de duas formas:

A primeira forma de acionamento é do tipo liga/desliga, este acionamento permite apenas dois estados para a carga, sendo que quando está acionada a carga opera em sua potência máxima. A segunda forma é o acionamento gradual, este acionamento permite que a carga seja ativada em valores intermediários entre seu mínimo e máximo valor de potência. Alguns equipamentos como o ar condicionado acionado por inversor PWM, chamado de “*inverter*”, operam de forma gradual. A tecnologia *inverter* controla a velocidade do compressor do ar condicionado em função da temperatura desejada. Dessa forma o consumo de energia do equipamento varia conforme a necessidade de operação do compressor (JING e XUESONG, 2011).

Diversas técnicas podem ser utilizadas para se realizar o acionamento gradual, entre as principais pode-se citar o PWM (*Pulse-Width Modulation*). Utilizando o PWM é possível se controlar a potência de uma carga através de um sinal modulado em que se varia sua razão cíclica. Um sinal PWM pode ser implementado para controle de uma carga utilizando dispositivos como IGBTs e TRIACs.

A partir dos dados apresentados pela PPH e as características das cargas residenciais, verifica-se que as cargas mais significativas e que podem ser gerenciadas para redução da demanda total de energia são: Aquecimento de água e aparelho de ar condicionado. Cargas como televisores, iluminação e geladeiras são apenas monitoradas.

Assim, com a finalidade de posteriormente utilizar os modelos para implementar um emulador de consumo de energia elétrica residencial, na sequência são apresentados modelos matemáticos das seguintes cargas elétricas residenciais:

- Reservatório para aquecimento de água;
- Um ambiente climatizado por um aparelho de ar condicionado;
- Geladeira;

- Iluminação e televisores.

2.2 MODELO DO RESERVATÓRIO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Embora na maioria das residências ainda predomina o chuveiro elétrico de passagem, no qual a água é aquecida no momento do consumo, o aquecimento de água em um reservatório para uso posterior tem sido utilizado em um grande número de residências. Esta última estrutura permite que o consumo de energia para aquecimento seja empregado em horário diferente do consumo. Ainda, a mesma também permite o uso de painéis solares para aquecimento total ou parcial da água, reduzindo assim o consumo total de energia elétrica. Desta forma, este modelo será utilizado neste trabalho como uma proposta de reduzir a demanda de energia elétrica, mesmo que não exista aquecimento da água através de energia solar.

O modelo matemático apresentado em (CERCHIARO, 2006) foi utilizado para representar um reservatório de armazenamento e aquecimento de água através da utilização de um resistor. Este modelo foi validado experimentalmente pelos autores, sendo uma representação adequada do comportamento dinâmico do aquecimento de água com potência $P_f(t)$ em um ambiente de armazenamento com volume V , com vazão $Q(t)$, tendo saída de água quente e entrada de água fria, e perdas de calor $P_a(t)$ para o ambiente. O modelo matemático é apresentado na equação (1) em que $T_e(t)$ é a temperatura de entrada da água no tanque, $T_s(t)$ é a temperatura de saída da água do tanque, C_p é o calor específico da água e r_o é a densidade da água.

$$\frac{P_f(t) - P_a(t)}{4,1868} + r_o C_p \frac{Q(t)}{6.10^6 V} [T_e(t) - T_s(t)] = r_o C_p V \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (1)$$

Para converter as unidades de potência $P_f(t)$ e $P_a(t)$ de watts para cal/s é feita a multiplicação dos termos pela constante $1/4,1868$, pois 1 cal/s é igual a $4,1868 \text{ W}$. O termo $Q(t)$ é multiplicado pela constante $1/60.10^6$ para se converter a vazão de ml/min para m^3/s , pois $1 \text{ m}^3/\text{s}$ é igual a 60.10^6 ml/m . Simplificando a equação (1) e isolando a derivada do termo $dT_s(t)/dt$ pode-se representar a equação diferencial do modelo de aquecimento de água na forma dada pela equação (2).

$$\frac{dT_s(t)}{dt} = \frac{1}{r_o C_p V} \frac{P_f(t) - P_a(t)}{4,1868} + \frac{1}{V} \frac{Q(t)}{6.10^6} [T_e(t) - T_s(t)] \quad (2)$$

É possível observar na equação (2) que a potência líquida de aquecimento é menor do que a potência fornecida em razão das perdas de calor do sistema para o ambiente ($P_f(t) - P_a(t)$). As perdas de calor para o ambiente P_a foram calculadas utilizando a equação (3) apresentada por (LAFAY, 2005) para os intervalos de tempo t , em que U é o coeficiente global de perdas térmicas dado em $W/^\circ C$, T_s é a temperatura de entrada da água no tanque ($^\circ C$) e o T_a é a temperatura externa ou temperatura ambiente ($^\circ C$). Para o coeficiente global de perdas U , foi utilizado o valor de $4,2 W/^\circ C$ que foi encontrado de forma experimental em (LAFAY, 2005) para um reservatório horizontal de polietileno isolado termicamente com capacidade de 600 litros. Ainda, a vazão é um elemento que também influencia no sistema, podendo aumentar ou diminuir o calor do sistema dependendo da temperatura do líquido de entrada. Neste trabalho foi considerada uma vazão típica de 5000 ml/min.

$$P_a = U(T_s - T_a)\Delta t \quad (3)$$

No modelo matemático utilizado neste trabalho não é contemplado o fenômeno de estratificação térmica, que consiste na diferença de temperaturas ao longo das alturas do reservatório em função de diferentes posições de instalação da entrada e saída de água (LAFAY, 2005).

2.2.1 Simulação Do Modelo Do Reservatório Para Aquecimento De Água

O modelo matemático da equação (2) foi implementado no *Software Matlab Simulink* conforme apresentado na Figura 8. Os valores utilizados na simulação são descritos na Tabela 1.

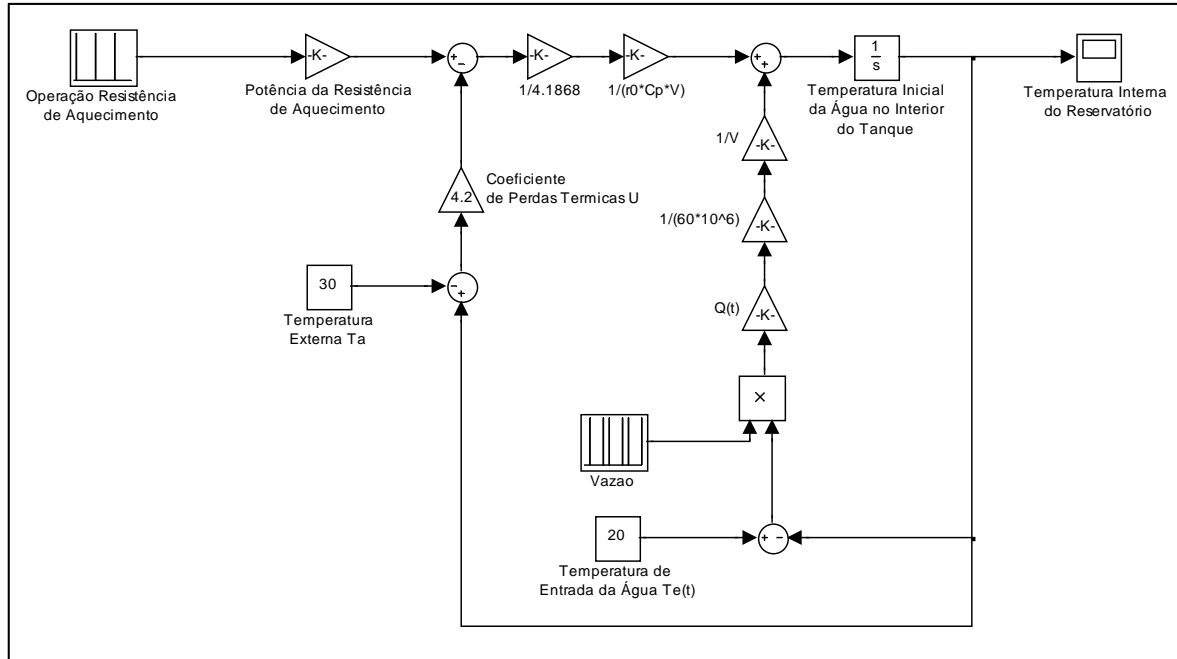


Figura 8 - Modelo do Reservatório de Água.
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1 - Valores Utilizados na Simulação do Modelo do Reservatório de Água.

Descrição	Símbolo	Valores
Potência da Resistência	$P_f(t)$	5000 W
Densidade da água	ρ_o	990 kg/m ³
Calor específico da água	C_p	10 ³ cal/kg°C
Vazão de entrada e saída da água	$Q(t)$	5000 ml/min
Temperatura de entrada da água	$T_e(t)$	20 °C
Volume da água no interior do reservatório	V	0,2 m ³
Coefficiente global de perdas térmicas	U	4,2 W/°C
Temperatura interna inicial da água	$T_s(0)$	25 °C
Temperatura externa	T_a	30°C

Fonte: Autoria Própria.

A simulação possui duração de 24 horas e foi realizada sem o controle da resistência de aquecimento de água. Ou seja, nesta simulação não é parametrizado um valor de temperatura da água a ser mantida pelo sistema. O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento dinâmico do modelo matemático do reservatório de aquecimento de água. Foi utilizado um valor de fixo de 30°C para a temperatura externa T_a durante toda a simulação. A

sequência e períodos de acionamento das cargas foram considerados como um processo cíclico que se repete ao longo dos dias. Durante a simulação a resistência de aquecimento foi acionada por uma hora, entre 03h00m e 04h00m. Foram simulados dois períodos de vazão, o primeiro período com duração de quinze minutos entre as 06h00m e 06h15m e o segundo período com duração de trinta minutos ocorrendo entre 18h00m e 18h30m. Na Figura 9 é apresentado o resultado da simulação onde é possível observar que durante o horário em que a potência de aquecimento ficou acionada ocorreu um aumento na temperatura interna. Após o desligamento da potência as 04h00m a temperatura começa a diminuir devido à perda de calor para o ambiente. A partir das 06h00m ocorre o primeiro período de vazão causando uma diminuição acentuada da temperatura. Após a vazão ser encerrada a temperatura interna continua a diminuir, porém de forma mais lenta devido à perda de calor para o ambiente. As 18h00m ocorre a segunda vazão causando novamente uma diminuição acentuada na temperatura interna do reservatório.

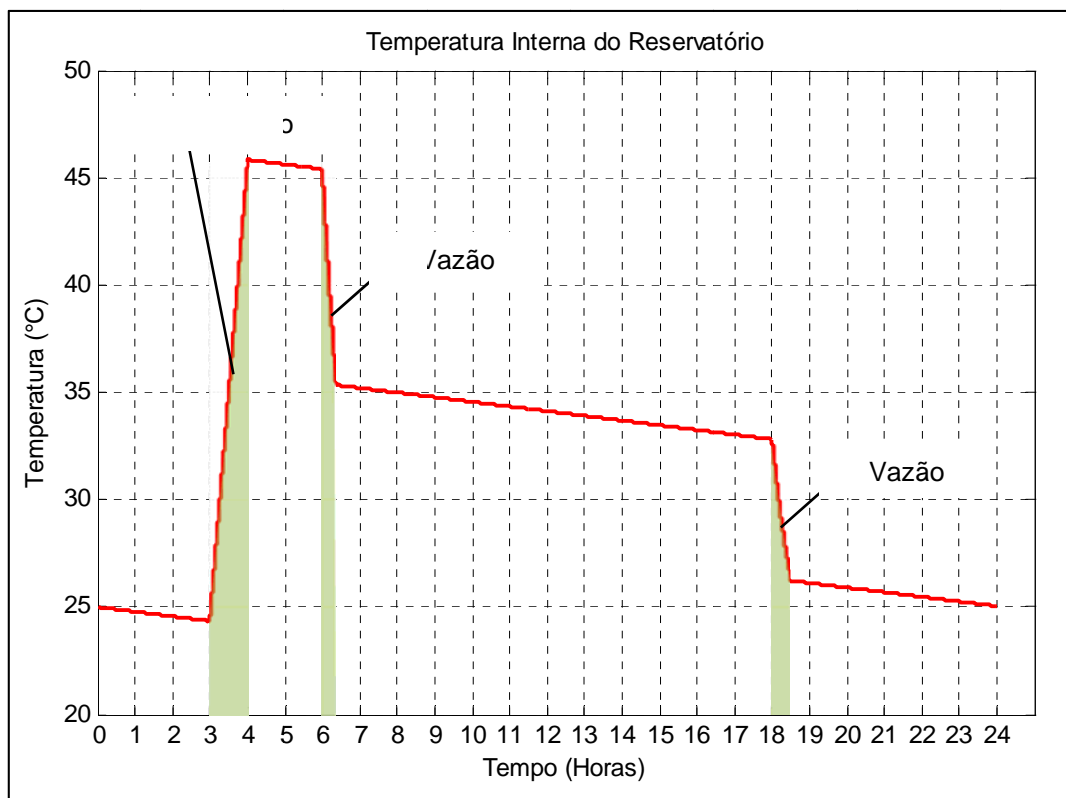


Figura 9 - Temperatura Interna do Reservatório.
Fonte: Autoria Própria.

2.3 MODELO TÉRMICO DE UM AMBIENTE “CLIMATIZADO” POR AR CONDICIONADO

Em um ambiente podem existir diversos elementos que geram ou retiram calor do recinto. O processo de climatização tem como objetivo manter a temperatura de um ambiente fechado em um determinado valor. Para se realizar a climatização de um recinto é necessário identificar e analisar os elementos térmicos do ambiente através de um cálculo que determina a carga térmica do ambiente. No cálculo de carga térmica é definida a quantidade de calor que deve ser retirada (resfriamento) ou colocada (aquecimento) no ambiente a fim de se manter as condições de temperatura desejadas (DEMEC, 2010). Entre as principais variáveis que determinam a carga térmica, pode-se citar:

- Radiação solar através de superfícies transparentes;
- Condução de calor do exterior para o ambiente através das paredes, telhados, divisórias, tetos e pisos internos;
- Calor gerado no ambiente por ocupantes, animais, luzes e equipamentos;
- Transferência de calor devido à ventilação, renovação e infiltração de ar externo.

Através do cálculo de carga térmica é possível se especificar a potência térmica que é necessária para um aparelho de ar condicionado realizar a climatização do ambiente.

A modelagem de um ambiente climatizado e de um aparelho de ar condicionado envolve um grande número de variáveis se tornando em alguns casos um processo com elevado nível de complexidade. Na literatura é possível encontrar diversos modelos com diferentes abordagens. Em (PAHWA e BRICE, 1985) é apresentado um modelo em que a temperatura interna de uma residência pode ser analisada se realizando uma analogia com o comportamento de um circuito elétrico. Na Figura 10 é apresentado um circuito em que a tensão de entrada V_e representa a temperatura externa, a resistência R_c equivale a resistência térmica e o C_i representa a carga térmica do ambiente. A fonte de corrente I_c equivale a fontes geradoras de calor como: radiação solar, condução de calor por paredes, pisos e teto, calor gerado por ocupação de pessoas e equipamentos e transferência de calor devido a ventilação e infiltração. A fonte de corrente I_{ac} representa o efeito de um aparelho de ar condicionado no ambiente. A chave S representa o controle de acionamento do ar condicionado. A temperatura interna do ambiente é representada pela tensão no capacitor C_r . Neste modelo o autor utilizou uma técnica de identificação para estimar os valores dos

componentes do circuito. O estudo e análise dessa técnica de identificação não fazem parte do escopo deste trabalho, dessa forma este modelo não foi utilizado.

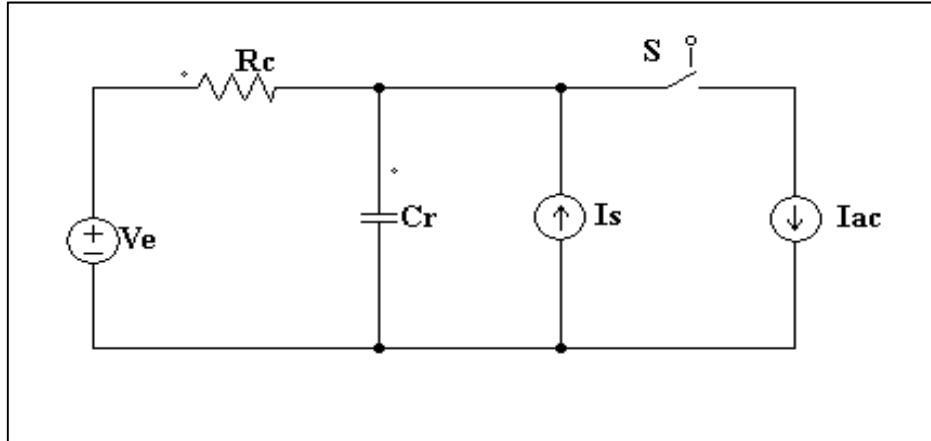


Figura 10 - Representação em forma de circuito de um ambiente climatizado.
Fonte: Autoria Própria.

Em (SHAO, PIPATTANASOMPORN e RAHMAN, 2012) é apresentado um modelo matemático para representar o comportamento dinâmico de um ambiente climatizado dado pela equação (4) em que T_i representa a temperatura interna, G_i representa o ganho de calor do ambiente dado. O termo C_{HVAC} representa a capacidade de aquecimento/resfriamento do aparelho de ar condicionado. O termo Δc é a energia necessária para mudar temperatura do ambiente em 1 °F e o termo $w_{AC,i}$ representado o estado ligado/desligado do ar condicionado.

$$T_{i+1} = T_i + \Delta t \frac{G_i}{\Delta c} + \Delta t \frac{C_{HVAC}}{\Delta c} w_{AC,i} \quad (4)$$

O ganho de calor do ambiente é calculado utilizando a equação (5) em que a A_{parede} , A_{teto} , $A_{janelas}$ representa a área das paredes, teto e janelas do ambiente. R_{parede} , R_{teto} , $R_{janelas}$ representa resistência de aquecimento das paredes, teto e janelas. Ainda na equação tem-se η_{ac} que é o número de trocas de ar, V_{casa} que é o volume da casa, T_{out} é a temperatura externa, SHGC que representa o coeficiente de ganho de calor das janelas. O termo H_{solar} representa o ganho térmico por radiação solar, e o ganho térmico por ocupação de pessoas é representado pelo termo H_p .

$$G_i = \left(\frac{A_{parede}}{R_{parede}} + \frac{A_{teto}}{R_{teto}} + \frac{A_{janelas}}{R_{janelas}} \times \frac{11.77 \text{ Btu}}{\text{°F ft}^3} \times \eta_{ac} \times V_{casa} \right) \times (T_{out,i} - T_i) +$$

$$+ \text{SHGC} \times A_{janela_Sul} \times H_{solar} \frac{3.412 \frac{\text{Btu}}{\text{Wh}}}{10.76 \frac{\text{ft}^2}{\text{m}^2}} + H_p \quad (5)$$

E energia necessária para se alterar temperatura ambiente em 1°F é calculada pela equação (6) em que C_{ar} é o calor específico do ar.

$$\Delta c = C_{ar} \times V_{casa} \quad (6)$$

Embora o modelo representado pela equação (4), seja bastante completo o mesmo requer um grande número de parâmetros para sua implementação. Devido o foco deste trabalho ser os algoritmos de controle de demanda, não foi realizada uma análise aprofundada em modelos de alta complexidade. Desta forma, neste trabalho foi utilizado o modelo de temperatura ambiente apresentado e simulado por (LEEPHAKPREEDA, 2012). Este modelo utiliza um aparelho de ar condicionado para climatização interna de um dado ambiente. Na Figura 11 é apresentado um diagrama com as principais variáveis do modelo. A temperatura interna deve ser mantida próxima à temperatura de referência parametrizada em um controlador. Este controlador regula o ar condicionado para diminuir a diferença entre a temperatura interna e a temperatura de referência.

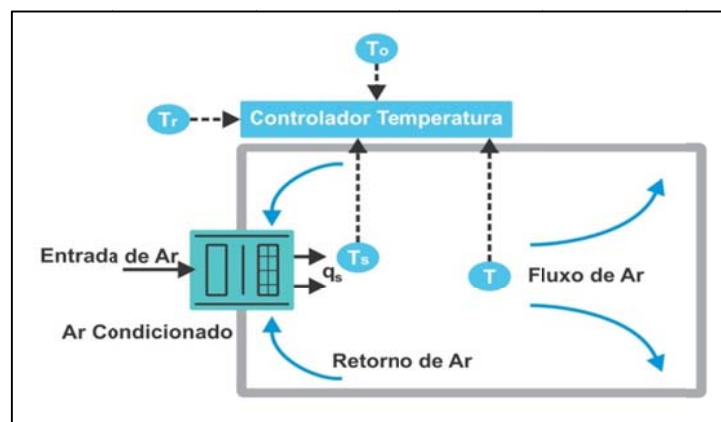


Figura 11 - Diagrama de um ambiente condicionado; T_r : Referência de temperatura, T_o : Temperatura externa; T : Temperatura interna, T_s : Temperatura saída do ar condicionado, q_s : Fluxo do ar condicionado.
Fonte: Autoria Própria.

A equação (7) representa matematicamente o modelo apresentado por (LEEPHAKPREEDA, 2012) que é baseado no princípio do equilíbrio térmico. A capacidade térmica do ambiente dado por C é igual à soma de diversas variáveis, dentre as quais se destacam como principais: Transmitância das paredes, teto e piso (η); Carga térmica interna provenientes de aparelhos elétricos e presença de pessoas (L) e ganho térmico por infiltração de ar (Q). Ainda na equação (7) são utilizados o ρ que é a densidade do ar; C_p que é o calor específico do ar; q_s que representa o fluxo de ar; T_0 que é a temperatura externa; T_i que representa a temperatura interna e T_{sa} que é a temperatura de saída do ar condicionado.

$$C \frac{dT_i}{dt} = \eta(T_0 - T_i) + \rho C_p q_s (T_{sa} - T_i) + L + Q \quad (7)$$

2.3.1 Simulação de um Modelo Térmico de um Ambiente “Climatizado” por Ar Condicionado

O modelo de temperatura interna foi implementado no *Software Matlab-Simulink* a partir da equação (7) e pode ser observado na Figura 12.

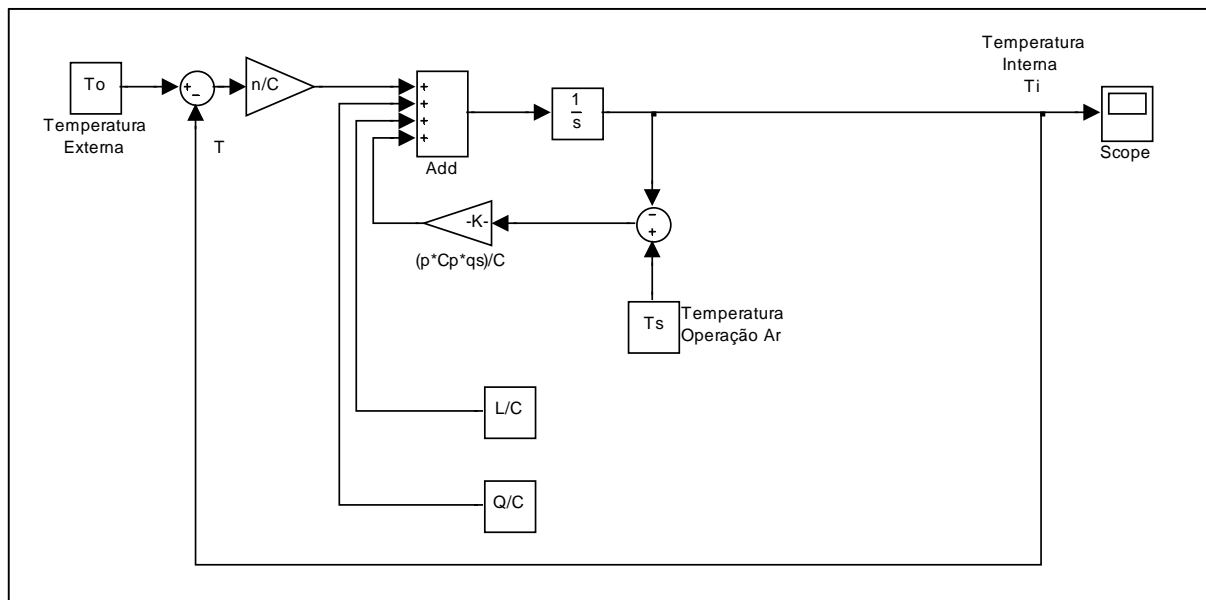


Figura 12 - Modelo de Temperatura Ambiente.
Fonte: Autoria Própria.

Na simulação foi considerada uma sala 21m² ocupada por quatro pessoas. Ainda, se considerou a utilização no interior da sala de dois computadores e duas lâmpadas fluorescentes, bem como a existência de duas janelas e uma porta.

O cálculo de transmitância térmica foi realizado considerando as dimensões e tipo de parede, teto e piso utilizado na sala. Conforme apresentado em (MORISHITA, SORGATO, *et al.*, 2010) foi utilizado o valor de transmitância térmica de 2,59 W/m²°C para as paredes com as seguintes características:

- Argamassa interna (2,5cm);
- Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm);
- Argamassa externa (2,5cm).

Para o teto se utilizou o valor de 1,79 W/m²°C de transmitância referente as seguintes características:

- Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm);
- Câmara de ar (> 5,0 cm);
- Telha cerâmica.

Para o piso foi utilizado o mesmo valor de transmitância das paredes. Considerando a sala com duas paredes com dimensões 7x3m e duas paredes com dimensões de 5x3m mais piso com dimensões de 7x5m, encontra-se um valor total de 93 m² para piso e parede e 21 m² para o teto. Na equação (8) é apresentado o cálculo de transmitância para as paredes e piso e na equação (9) é apresentado o cálculo para transmitância do teto. A transmitância total da sala é apresentada pela equação (10).

$$\eta_{pp} = 2.59 \times 93 = 0.24kW / ^\circ C \quad (8)$$

$$\eta_t = 1.79 \times 21 = 0.03kW / ^\circ C \quad (9)$$

$$\eta = 0.24 + 0.03 = 0.27kW / ^\circ C \quad (10)$$

A carga térmica interna é calculada considerando a ocupação de pessoas e equipamentos na sala. Conforme apresentado na NBR16401 um homem adulto executando um trabalho leve tem um calor liberado de 130 W, um computador possui calor liberado de 65

W e uma lâmpada fluorescente residencial possui uma dissipação de calor de 9 W/m^2 . Dessa forma na equação (11) é apresentado o cálculo da carga térmica para a sala:

$$L = (4 \times 130W) + (2 \times 65W) + (2 \times 9W) = 0.668kW \quad (11)$$

O ganho térmico por infiltração é realizado considerando a entrada de ar através de portas e janelas. Conforme apresentado na NBR 6401 uma janela comum possui infiltração de ar de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma porta bem ajustada possui infiltração de $6.5 \text{ m}^3/\text{h}$. Na equação (12) é apresentado para carga térmica por infiltração. A infiltração de ar total calculada é de $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$ que convertido para L/s encontra-se o valor de 2.63 L/s de vazão por infiltração V_i . Considerou-se uma diferença média entre a temperatura externa e interna Δt_{ei} de 7°C . Esse valor foi determinado pela diferença da temperatura externa fixa em 30°C e a temperatura interna de 23°C controlada pelo ar condicionado. O valor de 23°C é utilizado como referencia posteriormente nos ensaios em que o ar condicionado é controlado pelo controlador de demanda.

Substituindo as variáveis na equação (12) encontra-se o valor de 0.022 kW de ganho de calor por infiltração.

$$Q = \rho C_p V_i \Delta t_{ei} \quad (12)$$

Como referência para este trabalho, foi utilizado o ar condicionado da marca Consul modelo CBW12/CBX12. Este modelo apresenta uma potência de refrigeração de 12.000 BTU e uma potência nominal de consumo de energia de 1 kW . Este modelo também possui um fluxo de ar de aproximadamente $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma saída de ar com temperatura média de 11°C

A capacidade térmica C foi determinada de forma empírica considerando a resposta de temperatura do modelo em função dos parâmetros de ganhos térmicos.

A parametrização do modelo na simulação foi realizada utilizando os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores Utilizados na Simulação do Modelo de Temperatura Ambiente.

Descrição	Dados	Valores
Temperatura externa	T_o	30 °C
Capacidade térmica	C	200 kJ/°C
Transmitância	η	0,27 kW/°C
Densidade do ar	ρ	1,2 kg/m ³
Calor específico do ar	C_p	1 kJ/kg°C
Fluxo de ar	q_s	0,5 m ³ /h
Temperatura de saída do ar condicionado	T_{sa}	11 °C
Carga térmica interna	L	0,668 kW
Ganho térmico por infiltração	Q	0.022 kW
Potência Ar Condicionado	P_a	1 kW

Fonte: Autoria Própria.

A simulação do modelo de temperatura ambiente teve duração de 120 minutos. O modelo foi simulado sem o controlador de temperatura e o ar condicionado ficou ligado durante todo o período de simulação. A temperatura externa foi fixada em 30°C ao longo de toda a simulação, a temperatura interna inicial também foi parametrizada em 30°C. É possível observar na Figura 13 que após 30 minutos de simulação a temperatura interna chegou a aproximadamente 18,1°C, e se manteve constante em razão da temperatura externa ser fixa. Este comportamento foi semelhante ao apresentado nas simulações dos autores do modelo em (LEEPHAKPREEDA, 2012).

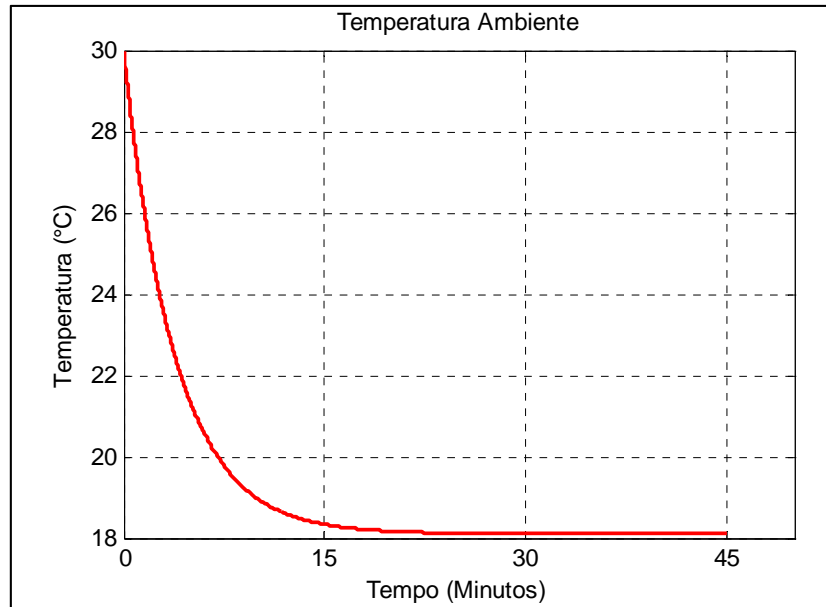


Figura 13- Simulação da Temperatura Ambiente.
Fonte: Autoria Própria.

A simulação foi realizada novamente variando-se o valor de carga térmica interna (L). Aos 90 minutos de simulação a sala deixa de ser ocupada e as quatro pessoas saem do ambiente bem como os computadores e iluminação são desligados. Observa-se na Figura 14 que a partir desse instante a temperatura interna começa a diminuir chegando a aproximadamente 17 °C, isso ocorre devido a ação do ar condicionado e a redução da fonte geradora de calor. A partir dos 120 minutos de simulação o ambiente volta a ser ocupado pelas quatro pessoas e pelas demais fontes de calor. Dessa forma observa-se que em 120 minutos que a temperatura interior começa a se elevar se estabilizando a aproximadamente 18°C, o aumento da temperatura ocorre devido inserção das fontes geradoras de calor no ambiente.

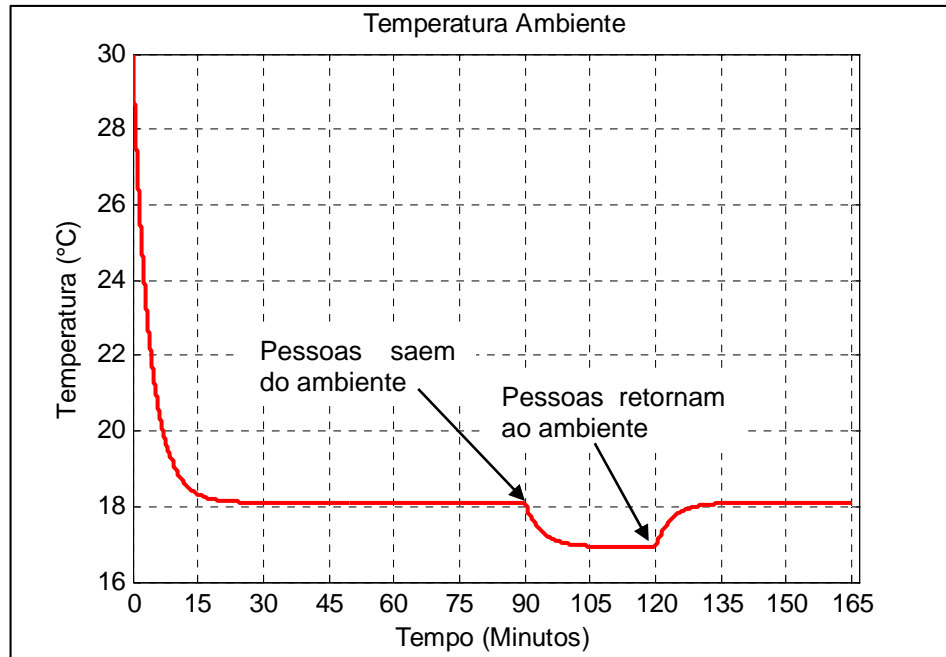


Figura 14 - Simulação da temperatura ambiente com variação da carga térmica.
Fonte: Autoria Própria.

2.4 MODELO DE CARGAS INSTANTÂNEAS RESIDENCIAIS (CI)

Neste modelo foram consideradas a utilização de cargas instantâneas (CI) como iluminação interna, televisores e uma geladeira em uma residência. Essas cargas foram modeladas em função de seus estados de funcionamento ligado ou desligado. Os modelos matemáticos das cargas de iluminação televisores e geladeira estão representados respectivamente pelas equações (13), (14) e (15). Em que PC_{IL} representa a potência total consumida pela iluminação dada pelo produto da potência nominal das lâmpadas (P_{IL}), a quantidade de lâmpadas (Q_{IL}) e seu estado de acionamento ligado/desligado (E_{IL}). A potência consumida pelos televisores (PC_{TV}) é calculada através da potência nominal dos televisores (P_{TV}), a quantidade de televisores (Q_{TV}) e seu estado de acionamento (E_{TV}). O termo (PC_G) representa a potência consumida pela geladeira e é calculado através da potência nominal da geladeira (P_G) e seu estado de funcionamento (E_G).

$$PC_{IL} = P_{IL} Q_{IL} E_{IL} \quad (13)$$

$$PC_{TV} = P_{TV} Q_{TV} E_{TV} \quad (14)$$

$$PC_G = P_G E_G \quad (15)$$

2.4.1 Simulação de Cargas Instantâneas Residenciais

Na Figura 15 são apresentados os modelos implementados no *Software Matlab Simulink* a partir das equações (13), (14) (15) e para a simulação de consumo das lâmpadas e televisores.

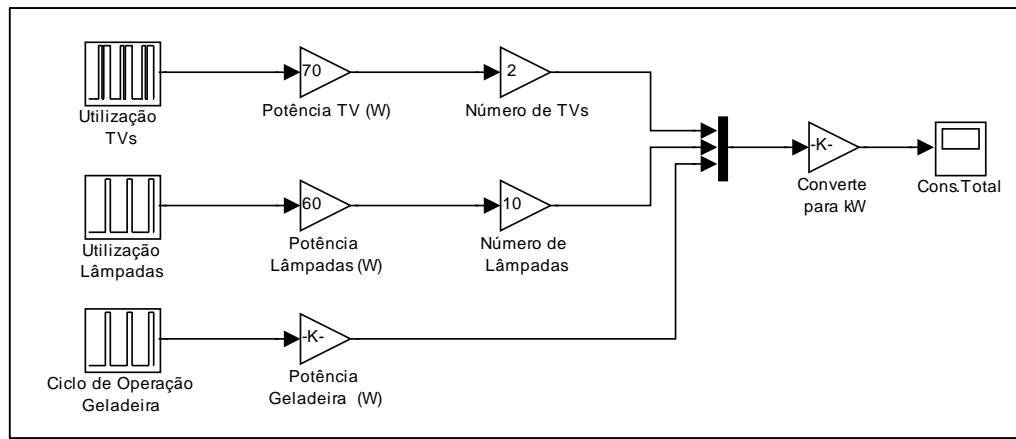


Figura 15 - Modelo de Iluminação, televisores e geladeira.
Fonte: Autoria Própria.

Na simulação foram considerados dois televisores cada um com potência nominal de 70 W, dez lâmpadas com potência nominal de 60 W cada e uma geladeira com potência nominal de 300 W. As lâmpadas foram acionadas entre as 18h00m e 24h00m. Os dois televisores foram acionados entre as 11h00m e 14h00m e entre 17h00 e 24h00 e a geladeira foi acionada por períodos de 10 minutos a cada 30 minutos. Na Figura 16 é apresentado o resultado da simulação.

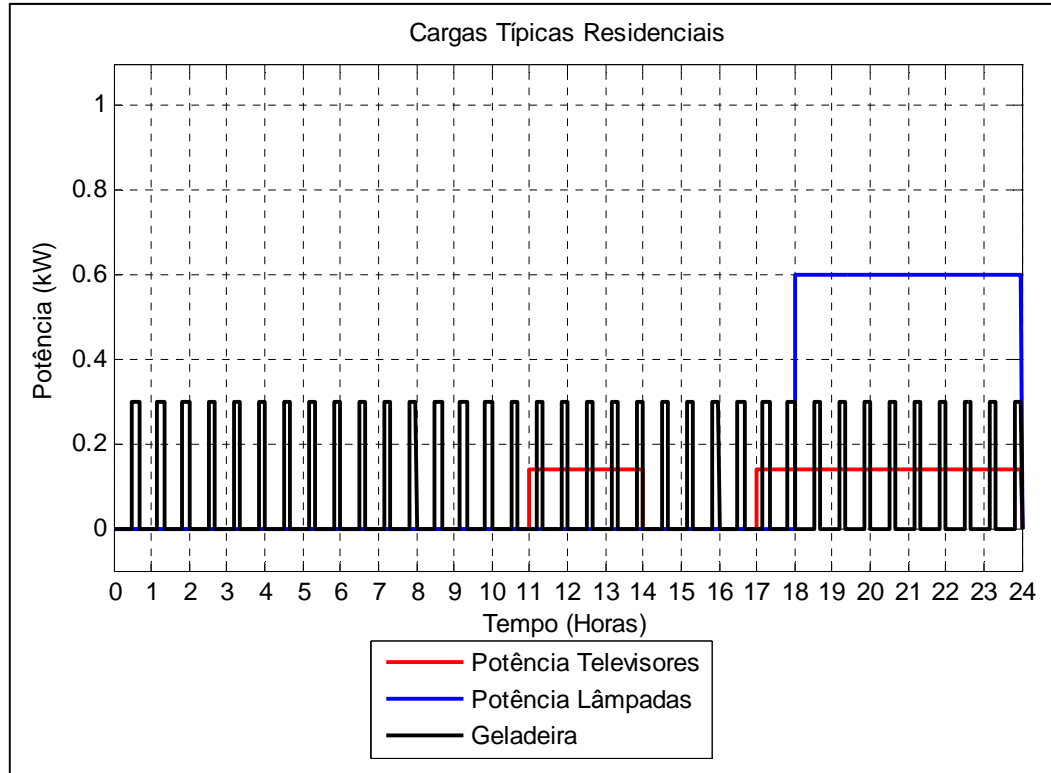


Figura 16 - Simulação Cargas Instantâneas.
Fonte: Autoria Própria.

2.5 MODELO DE CONSUMIDOR DE ENERGIA RESIDENCIAL

Utilizando os modelos apresentados anteriormente, foi implementado um modelo que representa o consumo de energia elétrica em uma residência. A potência consumida pelo sistema de ar condicionado PC_{AC} e a potência consumida pelo aquecimento de água PC_{AQ} , são representadas respectivamente pelas equações (16) e (17), em que P_{AC} é a potência nominal do ar condicionado e P_{AQ} é potência nominal do resistor de aquecimento de água. Ambas as equações estão relacionadas ao sinal de controle proveniente do controlador de demanda, em que DR_{AC} é o sinal de controle que permite o acionamento do ar condicionado e o DR_{AQ} é o sinal de controle que permite o acionamento do aquecimento de água.

$$PC_{AC} = P_{AC} DR_{AC} \quad (16)$$

$$PC_{AQ} = P_{AQ} DR_{AQ} \quad (17)$$

O consumo total de energia elétrica da residência dado pela equação (18), é calculada utilizando as equações (13), (14), (15), (16) e (17).

$$PTC_{RES} = PC_{IL} + PC_{TV} + PC_G + PC_{AC} + PC_{AQ} \quad (18)$$

2.5.1 Simulação do Modelo de Consumo de Energia Residencial

O modelo de consumo de energia residencial foi implementado no *Software Matlab Simulink* conforme apresentado na Figura 17. Foram criados blocos para os modelos de Cargas Instantâneas, Reservatório de aquecimento de Água e Temperatura Ambiente. A potência resultante dos três blocos é somada e resulta no consumo total de energia na residência.

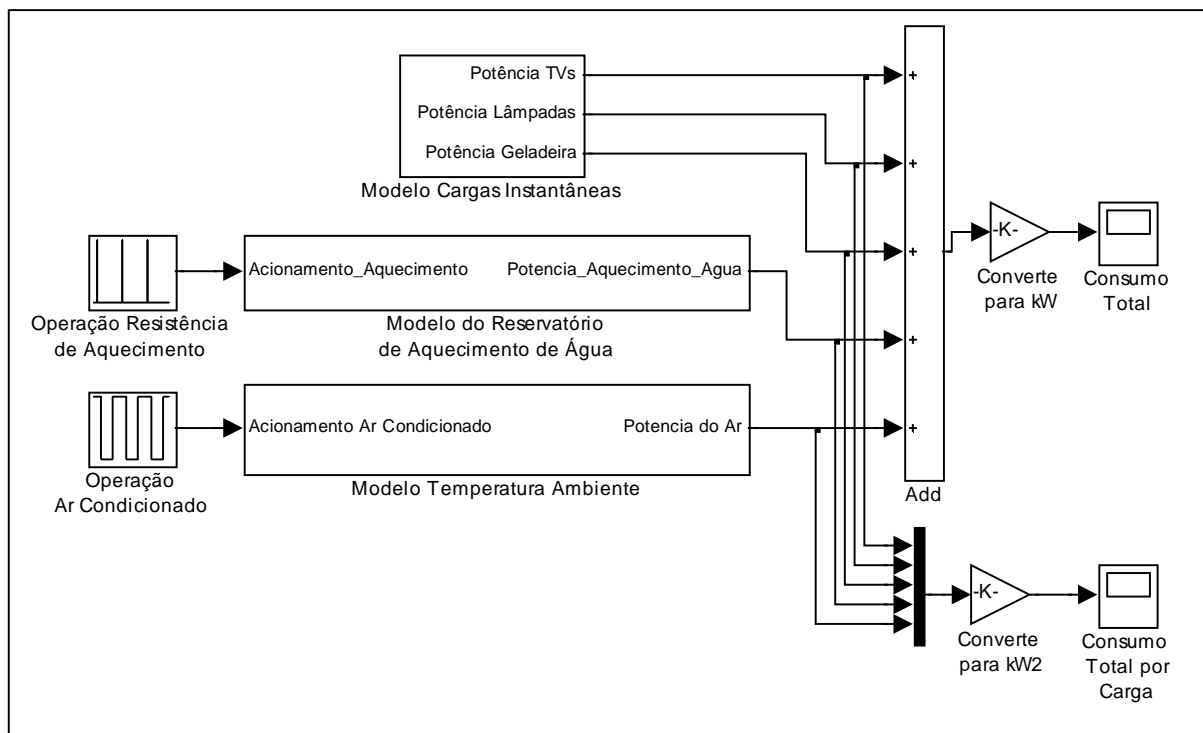
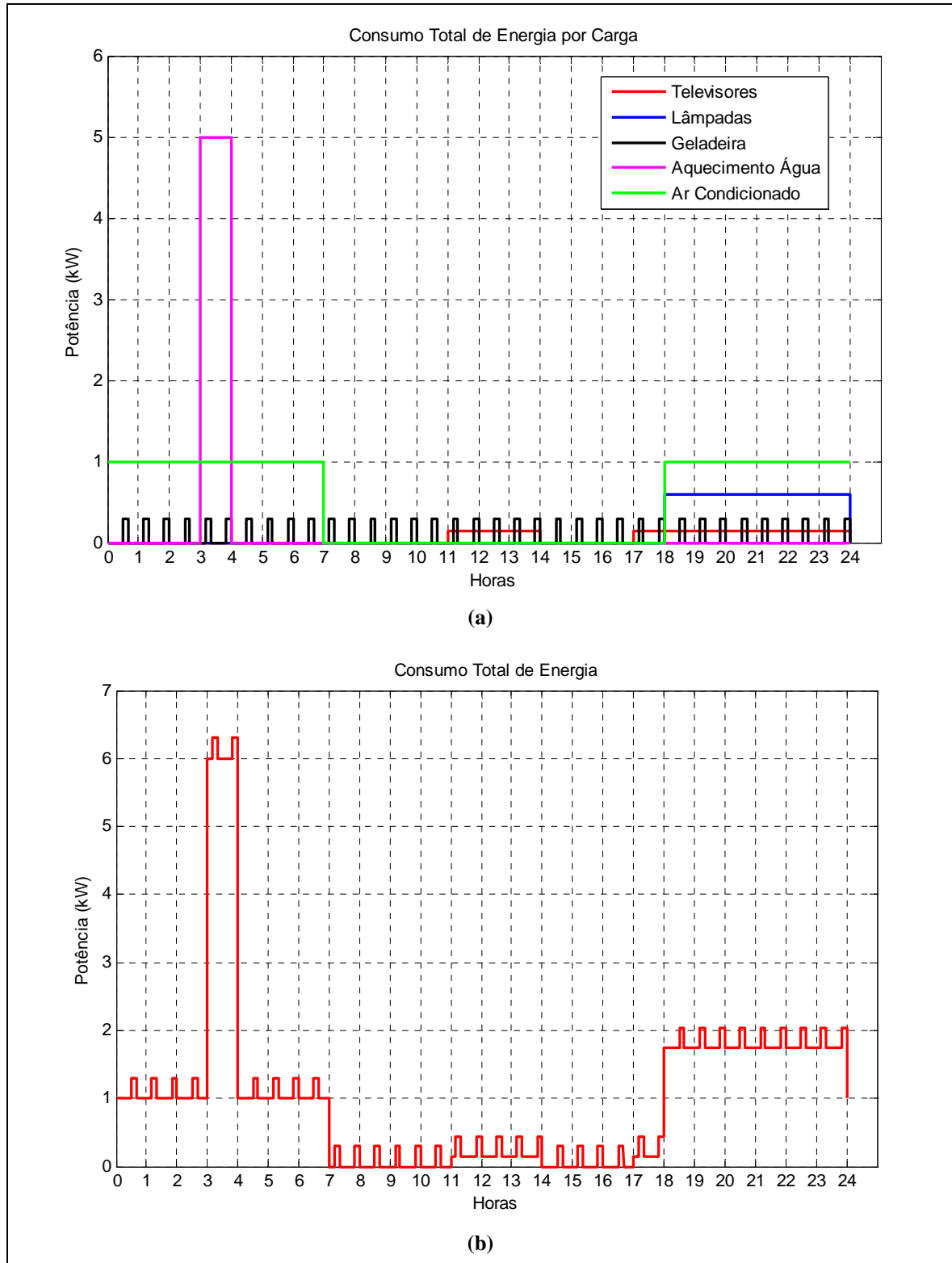


Figura 17 - Modelo de Consumo de Energia Residencial.
Fonte: Autoria Própria.

A simulação realizada do consumo de energia residencial teve duração de 24 horas. Na Figura 18a pode-se observar o resultado da simulação onde são apresentados os valores de potência de cada carga na residência. Na Figura 18b é apresentado o consumo total de energia da residência. O aquecimento de água foi acionado entre as 03h00m e 04h00m, a utilização do ar condicionado foi realizada entre as 18h00m até as 07h00m do dia seguinte. O acionamento

das lâmpadas ocorreu apenas no horário noturno das 18h00m até 24h00m, e foram utilizados os televisores entre as 11h00m até 14h00m e das 17h00m até 24h00m.



**Figura 18 - Simulação Modelo de consumo de Energia Residencial; (a) Consumo total por carga; (b) Consumo total da residência.
Fonte: Autoria Própria.**

2.6 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os modelos matemáticos e simulações computacionais das cargas elétricas residenciais utilizadas nesse trabalho. Com o objetivo de se realizar análise dos algoritmos de controle de demanda em um ambiente computacional, foi necessária a modelagem do sistema a ser analisado. A partir das simulações realizadas é possível avaliar o comportamento das variáveis de conforto em uma residência considerando diferentes situações de demanda de energia elétrica. No próximo capítulo será discutido um controlador de demanda com o objetivo de redução da demanda em uma residência com as cargas analisadas.

3 CONTROLADOR DE DEMANDA BASEADO EM PRIORIDADES (CDBP)

O uso de controladores de demanda residenciais tem sido visto como uma possível solução para a redução da demanda em horários de ponta e de pico possibilitando a redução de custos com energia tanto para consumidores quanto para concessionária. Porém para se realizar o controle de demanda deve-se considerar a utilização das cargas residenciais pelos usuários. Assim, nesse capítulo são realizadas simulações computacionais para análise do controlador apresentado por (PIPATTANASOMPORN, KUZLU e RAHMAN, 2012) em que o algoritmo de controle de demanda utiliza níveis de prioridade e parâmetros de conforto dos usuários. O algoritmo realiza o controle das cargas a fim de manter a demanda elétrica de uma residência abaixo de um determinado limite, e também de manter os níveis de conforto do usuário dentro das faixas parametrizadas. São controlados dois estados das cargas: estado ligado e estado desligado. O controle é feito em duas situações:

- Quando o limite de demanda é ultrapassado a carga ativa de menor prioridade é desligada;
- Ao ocorrer uma violação nos níveis de conforto do usuário a carga pode ser ativada ou desativada.

3.1 PRIORIDADE DAS CARGAS E PARÂMETROS DE PREFERÊNCIA

A definição de prioridade de acionamento de cargas é um requisito para implementação de algumas estratégias de controle de demanda, como em (PIPATTANASOMPORN, KUZLU e RAHMAN, 2012). Esta definição deve considerar o perfil de conforto requerido pelo usuário, a potência e o tipo de cada carga. Assim, foram definidos níveis de prioridade para se determinar em que ordem as cargas devem ser desativadas ao ocorrer a ultrapassagem do limite de demanda. As cargas são desativadas em ordem crescente, ou seja, da menos prioritária até a mais prioritária. Cargas como lâmpadas e geladeira são consideradas imprescindíveis, de forma que possuem prioridade máxima e não são desconectadas pelo controlador. Na Tabela 3 são apresentados os níveis de prioridade utilizados nas simulações. Foi definido com a prioridade mais alta o ar condicionado, seguido do aquecimento de água com prioridade mais baixa. Ainda na Tabela 3 é possível se verificar os níveis de conforto de usuário parametrizados para cada carga. A temperatura ambiente foi parametrizada conforme a recomendação de nível de conforto da ANVISA (ANVISA, 2003) para o ponto de ajuste (*setpoint*) de 23°C. A temperatura parametrizada para o ponto de ajuste

do aquecimento de água foi de 38°C, conforme apresentado por (LAFAY, 2005) como valor de temperatura adequada para banho.

Para os pontos de ajuste do ar condicionado e temperatura da água foram considerados valores de histerese de ($\pm 1^\circ\text{C}$). Dessa forma os níveis de conforto do usuário para o ar condicionado ficaram definidos com valor mínimo de 22°C e máximo de 24°C, assumindo uma temperatura média ao longo do tempo de 23°C. Os níveis de conforto para aquecimento de água ficaram definidos como valor mínimo de 37°C e máximo de 39°C, assumindo uma temperatura média ao longo do tempo de 38°C.

Tabela 3 - Prioridades e Níveis de Conforto do Usuário

Aplicação	Prioridade	Níveis de Conforto do Usuário
Ar Condicionado	2	23°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)
Aquecimento de Água	1	38°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)

Fonte: Autoria Própria.

3.2 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS CARGAS

A manutenção dos níveis de conforto dos usuários é realizada a partir da operação das cargas em função dos parâmetros do usuário. Neste trabalho são controladas duas cargas o ar condicionado e o aquecimento de água.

A operação do ar condicionado é representada pela equação (19). Caso a temperatura ambiente seja menor que a temperatura de ponto de ajuste (*setpoint*), o ar condicionado é desligado. Quando a temperatura ambiente ultrapassar a temperatura de ponto de ajuste, o ar condicionado é ligado, e caso a temperatura ambiente se encontre entre os limites de tolerância do ajuste de temperatura, o ar condicionado é mantido no mesmo estado do intervalo anterior.

$$E_{AC,n} = \begin{cases} 0, & T_{AMB,n} < T_{setAC,n} + \Delta T_{AC} \\ 1, & T_{AMB,n} > T_{setAC,n} + \Delta T_{AC} \\ E_{AC,n-1}, & T_{setAC,n} - \Delta T_{AC} \leq T_{AMB,n} \leq T_{setAC,n} + \Delta T_{AC} \end{cases} \quad (19)$$

O controle do aquecimento de água é semelhante ao controle do ar condicionado, porém com uma operação inversa. O aquecimento é ativado quando a temperatura da água no interior do tanque estiver abaixo do ponto de ajuste, e desativado quando a temperatura da

água ultrapassar o ponto de ajuste. Sendo que o estado do aquecimento será mantido o mesmo que no intervalo anterior quando a temperatura interna da água estiver entre os limites de tolerância. Na equação (20) é apresentado o controle do aquecimento de água.

$$E_{AQ,n} = \begin{cases} 0, & T_{INT,n} > T_{setAQ,n} + \Delta T_{AQ} \\ 1, & T_{INT,n} < T_{setAQ,n} - \Delta T_{AQ} \\ E_{AQ,n-1}, & T_{setAQ,n} - \Delta T_{AQ} \leq T_{INT,n} \leq T_{setAQ,n} + \Delta T_{AQ} \end{cases} \quad (20)$$

Neste algoritmo não é implementado o controle de vazão de entrada de saída de água do reservatório. A vazão é acionado pelo usuário ao se utilizar a água do reservatório.

3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE DEMANDA

Ao ocorrer alguma violação nos níveis de conforto do usuário, é necessário realizar o acionamento das cargas. O acionamento depende de uma estratégia de controle que tem como objetivo manter a demanda de energia elétrica abaixo de um determinado limite, considerando as prioridades das cargas. Na Figura 19 é apresentado o fluxograma com as estratégias de operação das cargas e do controle de demanda que foram utilizados nas simulações realizadas.

Inicialmente o limite de demanda, a prioridade das cargas e os parâmetros de conforto de usuários são verificados. Ainda, no processo de inicialização é verificado o estado de todas as cargas (ligado ou desligado), a temperatura da água e temperatura ambiente, a potência nominal das cargas e o consumo total da residência. Posteriormente é executada a lógica de controle de temperatura da água (equação (20)), caso a temperatura esteja abaixo do ponto de ajuste é feito um pedido de acionamento da resistência de aquecimento, este pedido é enviado para a função de controle de demanda que irá verificar a possibilidade de ativação da carga. Após a verificação da temperatura da água é executada a lógica de controle de temperatura ambiente (equação (19)), caso a temperatura ambiente esteja acima do ponto de ajuste é enviado um pedido de acionamento do ar condicionado para a função de controle de demanda. Após realizar o tratamento dos pedidos de acionamento de cargas, a função de controle de demanda retorna para o início das funções de operação das cargas. Este retorno pode ser realizado por dois caminhos que serão apresentados na próxima seção.

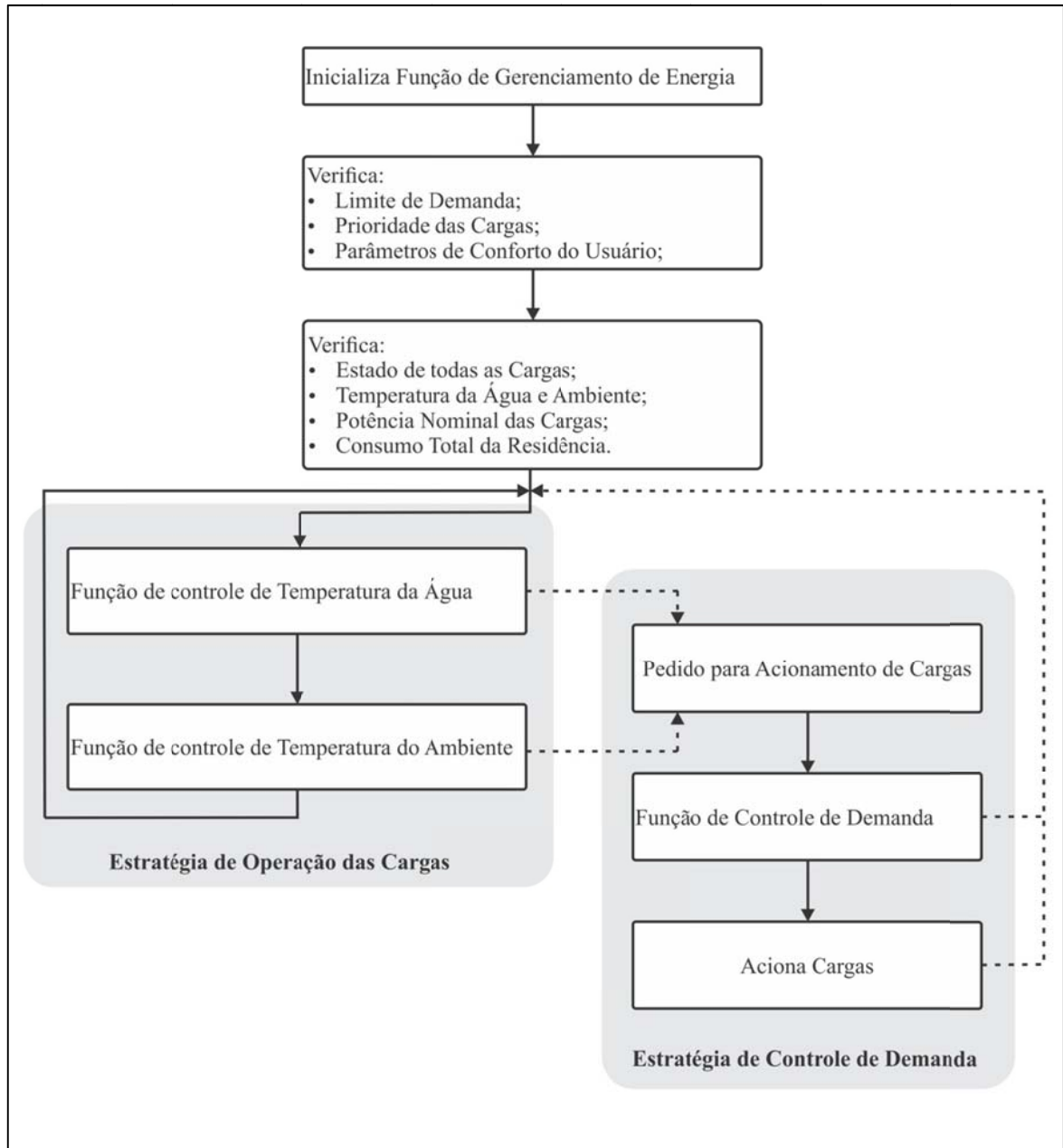


Figura 19 - Fluxograma da estratégia de operação de cargas e do controle de demanda.
Fonte: Autoria Própria.

O fluxograma da função do controle de demanda está representado na Figura 20. Ao receber um pedido de acionamento de uma carga a função realiza uma previsão da potência consumida (PP) que é resultante da soma da potência nominal da carga que enviou o pedido de ativação (PNC) e da potência total consumida pela residência (PTC). A seguir a função verifica o estado de um contador que previne que lógica de controle de demanda fique retida em um laço infinito. Após verificar o estado do contador, a função testa se a previsão de potência será maior que o limite de demanda (LD), caso não seja, a carga que enviou o pedido

de acionamento é acionada. Porém, se a previsão de potência for maior que limite de demanda, a função irá verificar o estado e a prioridade das cargas controláveis.

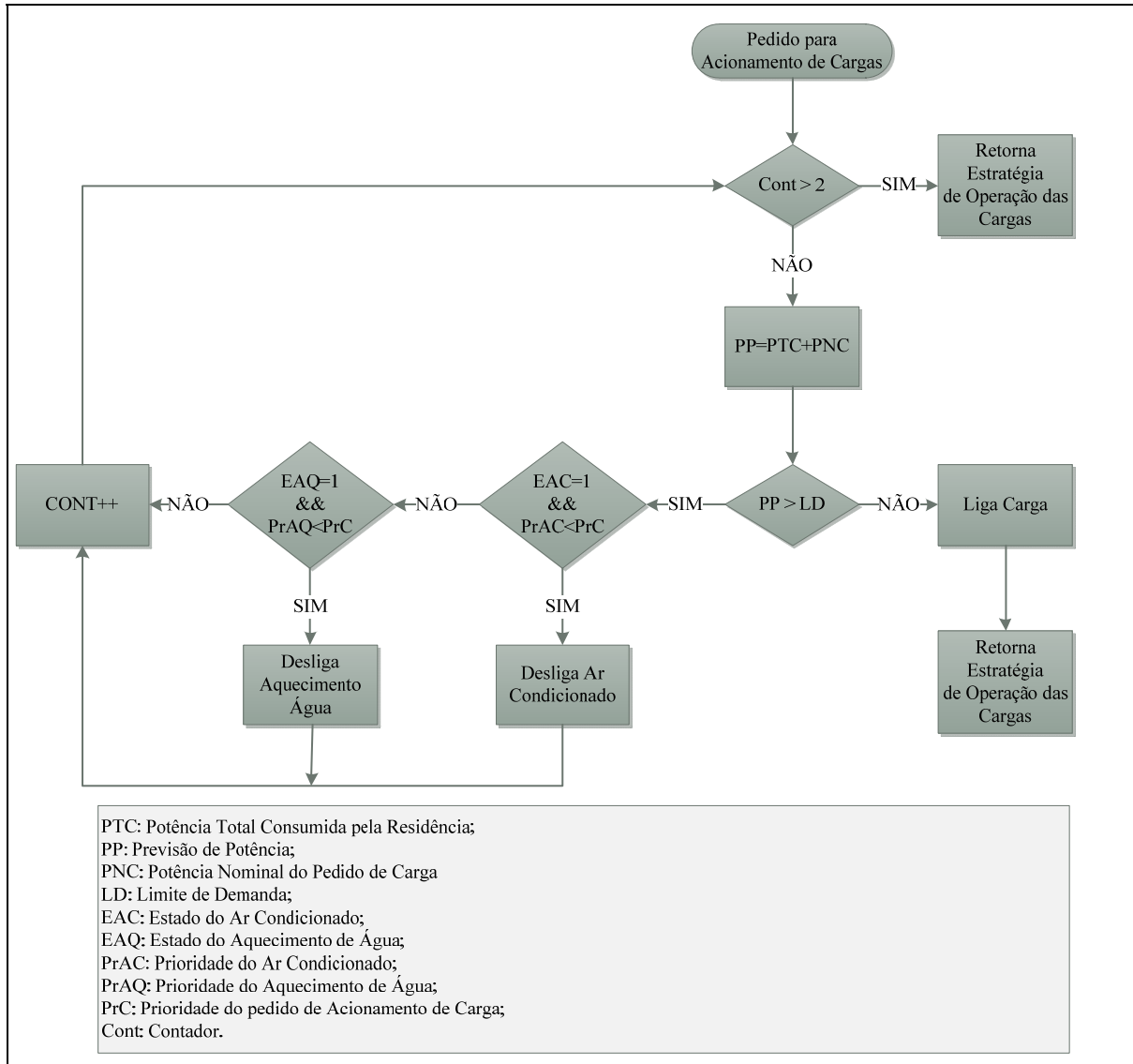


Figura 20 - Fluxograma do CDBP.

Fonte: Autoria Própria.

O primeiro teste das cargas é realizado com o ar condicionado, caso esteja ligado e sua prioridade seja menor que a prioridade da carga que solicitou acionamento, o ar condicionado é desligado. Com o desligamento do ar condicionado, a potência consumida pela residência diminui e uma nova comparação é feita entre a previsão de potência e o limite de demanda, se a previsão de potência for menor que o limite de demanda, a carga que solicitou o acionamento é ligada. Porém, se o ar condicionado não estiver ligado ou tenha prioridade maior que a prioridade de carga que enviou o pedido de acionamento, a função irá verificar o estado e prioridade do aquecimento da água.

A função de controle de demanda pode retornar para as funções de operação das cargas por dois caminhos: o primeiro é após ligar a carga que solicitou acionamento; e, o segundo caminho é através do contador que ao finalizar a contagem sai da função de controle de demanda.

3.4 SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR DE DEMANDA BASEADO EM PRIORIDADES (CDBP)

Na Figura 21 é apresentando o modelo implementado no Simulink para simulação das estratégias exibidas nas Figura 19 e Figura 20. O modelo é formado por três blocos principais.

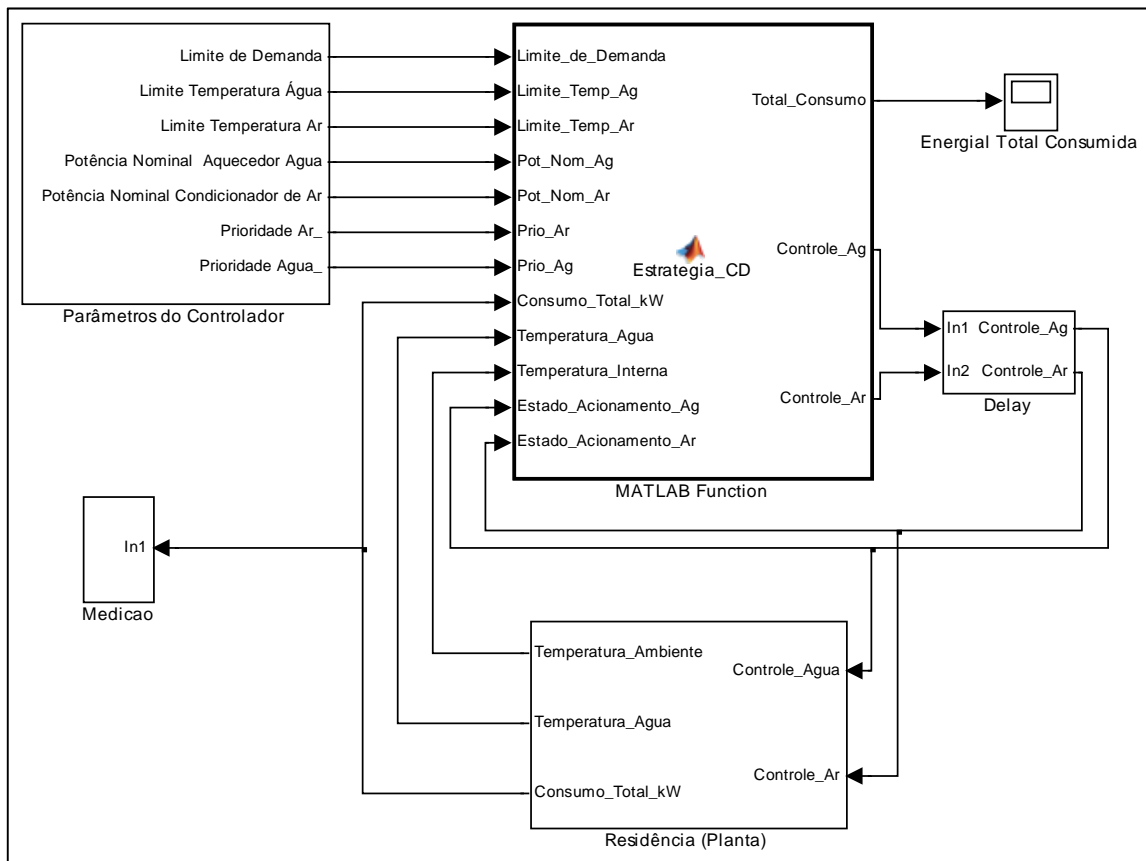


Figura 21 - Modelo *Simulink* do Controlador de Demanda.
Fonte: Autoria Própria.

O primeiro bloco é utilizado para parametrizar o controlador de demanda e é constituído pelos seguintes parâmetros:

- Limite De Demanda: Ponto de ajuste da demanda total de energia elétrica da residência (kW);

- Limite Temperatura Água: Ponto de ajuste da temperatura interna da água do tanque de aquecimento (°C);
- Limite Temperatura Ar: Ponto de ajuste de temperatura ambiente utilizado como referência para o ar condicionado (°C);
- Potência Nominal Aquecedor Água: Potência nominal da resistência de aquecimento do reservatório de água (kW);
- Potência Nominal Ar condicionado: Potência nominal do ar condicionado (kW);
- Prioridade do Ar: Valor de prioridade do ar condicionado;
- Prioridade Água: Valor de prioridade do aquecimento de água.

O segundo bloco, chamado de residência, é composto pelo modelo do tanque de aquecimento de água, modelo do ar condicionado e o modelo das cargas instantâneas, como lâmpadas, televisores e geladeira. Este bloco interage com os seguintes sinais:

Sinais de entrada:

- Controle Água; Sinal de controle de acionamento do aquecimento de água enviado pelo bloco de controle de demanda (0: Desligar; 1:Ligar);
- Controle Ar: Sinal de controle de acionamento do ar condicionado enviado pelo bloco de controle de demanda (0: Desligar; 1:Ligar).

Sinais de saída:

- Temperatura Ambiente: Temperatura ambiente do modelo do ar condicionado (°C);
- Temperatura Água: Temperatura da água no interior do reservatório de aquecimento de água (°C);
- Consumo Total kW: Consumo total de energia da residência (kW).

Na Figura 22 é apresentado de forma detalhada o bloco residência onde é possível se observar os blocos internos ar condicionado, aquecimento de água e cargas instantâneas. Os sinais de saída de potência desses três blocos são somados resultando na potência total consumida pela residência.

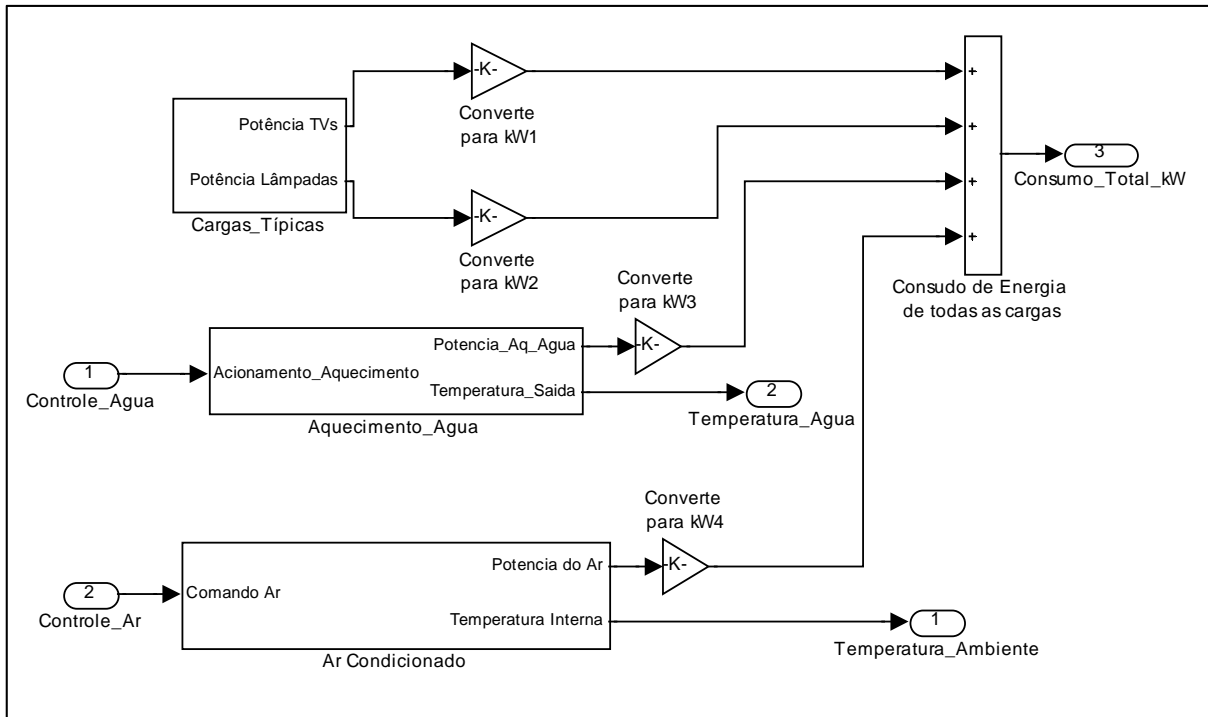


Figura 22 - Bloco Residência.
Fonte: Autoria Própria.

O terceiro bloco é constituído por um componente chamado de *MATLAB Function Block* que permite desenvolver funções do *MATLAB* e utilizá-las no ambiente *Simulink*. Este bloco foi chamado de CDBP e foi utilizado para se desenvolver as funções de operação das cargas e a função de controle de demanda. O bloco CDBP recebe sinais provenientes dos blocos de parametrização e residência, e controla o aquecimento da água e do ar condicionado respectivamente pelas saídas *Controle_Ag* e *Controle_Ar*.

Para a execução correta da simulação foi necessária a utilização de um bloco *Delay* para gerar um atraso na realimentação do bloco *MATLAB Function Block*, pois o *MATLAB Function Block* não permite ler um sinal gerado em sua própria saída em um mesmo instante de tempo. A simulação do modelo de controlador de demanda foi configurada para duração de 24 horas. O controlador de demanda foi parametrizado conforme apresentado na Tabela 4.

Inicialmente o sistema foi simulado sem atuação do limitador de demanda. A simulação foi realizada para um período de 24h, porém para uma melhor visualização dos resultados é exibido na Figura 23 apenas as primeiras 7 horas de simulação. As simulações não foram realizadas em tempo real, ou seja, durante o período de simulação foram gerados amostras que representam o comportamento do sistema para um período real de 24 horas.

Tabela 4 - Parametrização da simulação do controlador de demanda.

Descrição	Valores
Ponto de ajuste temperatura da água	38 °C
Ponto de ajuste temperatura do ar	23°C
Potência nominal do aquecedor de água	5 kW
Potência nominal do ar condicionado	1 kW
Prioridade do ar condicionado	2
Prioridade do aquecimento de água	1

Fonte: Autoria Própria.

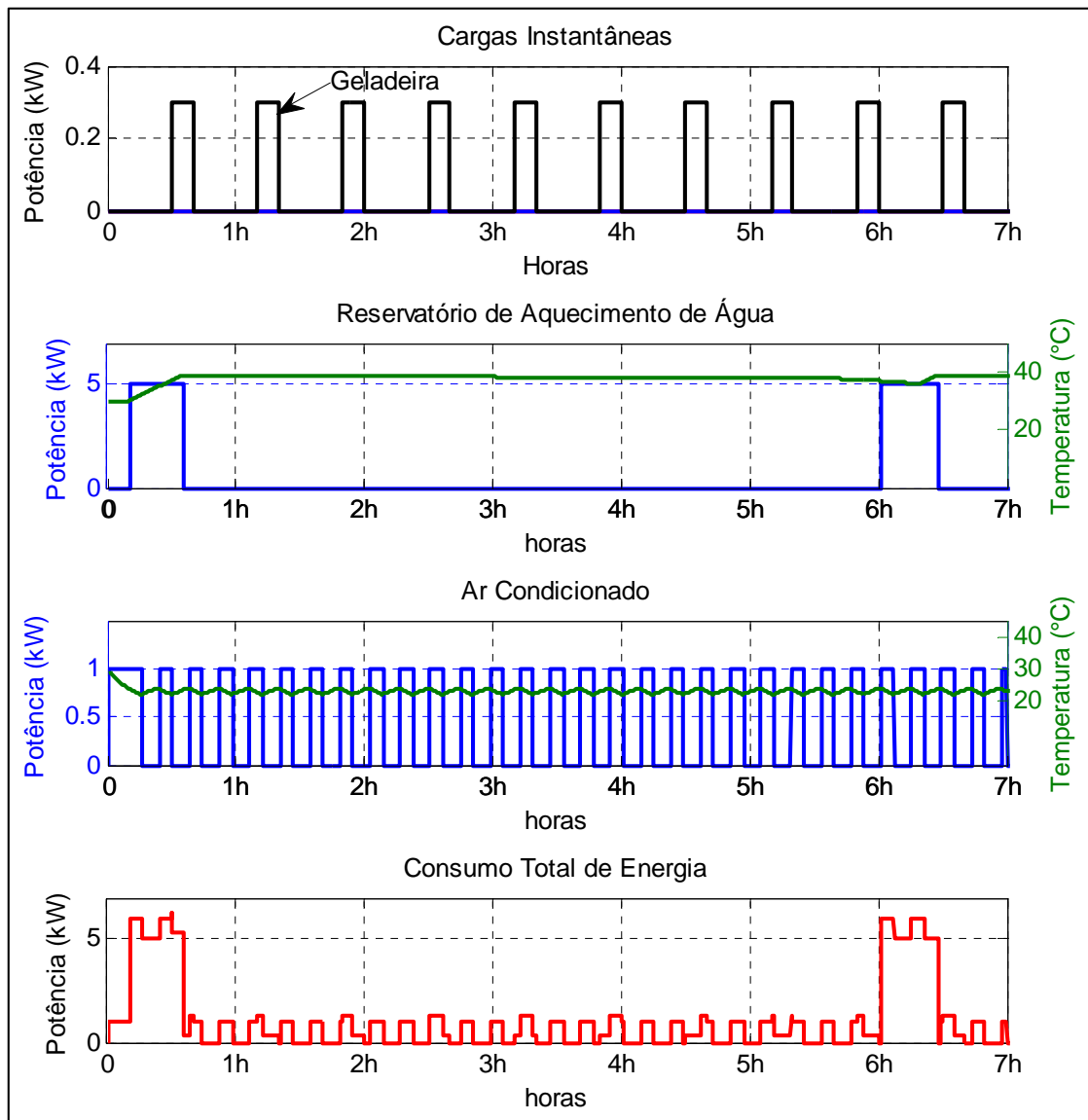


Figura 23 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, sem limitador de demanda utilizando o CDBP, primeiras 7 horas de simulação.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 24 se observa a potência das cargas instantâneas, o controle de aquecimento de água, o controle do ar condicionado e consumo total de energia. No gráfico das cargas instantâneas é exibido apenas o consumo da geladeira que foi a única carga instantânea acionada no período. No início da simulação a temperatura ambiente está com aproximadamente 30°C, ou seja, acima do valor desejado de 23°C. Dessa forma, o controlador aciona o ar condicionado. Após aproximadamente 15 minutos de acionamento a temperatura ambiente atinge o valor aproximado de 23°C e o ar condicionado é desligado. Na sequência a temperatura ambiente retorna a aumentar e ultrapassa o limite de tolerância de 24°C, novamente é acionado o ar condicionado para reduzir a temperatura ambiente até o valor desejado. O acionamento do ar condicionado continua a alternar entre ligado e desligado para manter a temperatura ambiente desejada até o final das sete horas de simulação.

A temperatura da água no início da simulação é de 30°C, dessa forma o controlador aciona o resistor de aquecimento para elevar a temperatura da água até o valor desejado de 38°C, ao atingir este valor o aquecimento é desligado. Na sequência se observa uma queda lenta na temperatura da água, causada pelas perdas de calor para ambiente. A partir das 6 horas é acionada a vazão no reservatório o que causa uma queda rápida na temperatura da água. Novamente o controlador aciona o resistor de aquecimento para elevar a temperatura para 38°C.

Durante a simulação apresentada na Figura 24 ocorreram dois períodos em que o aquecimento de água e o ar condicionado foram acionados juntos. O primeiro período no início da simulação e o segundo período a partir das 06h00m. O acionamento das duas cargas em um mesmo período resultou em picos de consumo de 6,3 kW.

Na Figura 24 é apresentado o resultado a partir das 18 horas onde é possível se observar o acionamento das cargas instantâneas (geladeira, televisores e lâmpadas), também se pode visualizar o acionamento do aquecimento de água e ar condicionado para a manutenção dos níveis de conforto do usuário. Durante esse período de simulação o pico mais alto de consumo foi de 7 kW, que ocorreu no momento em que todas as cargas estavam acionadas, logo no início da simulação.

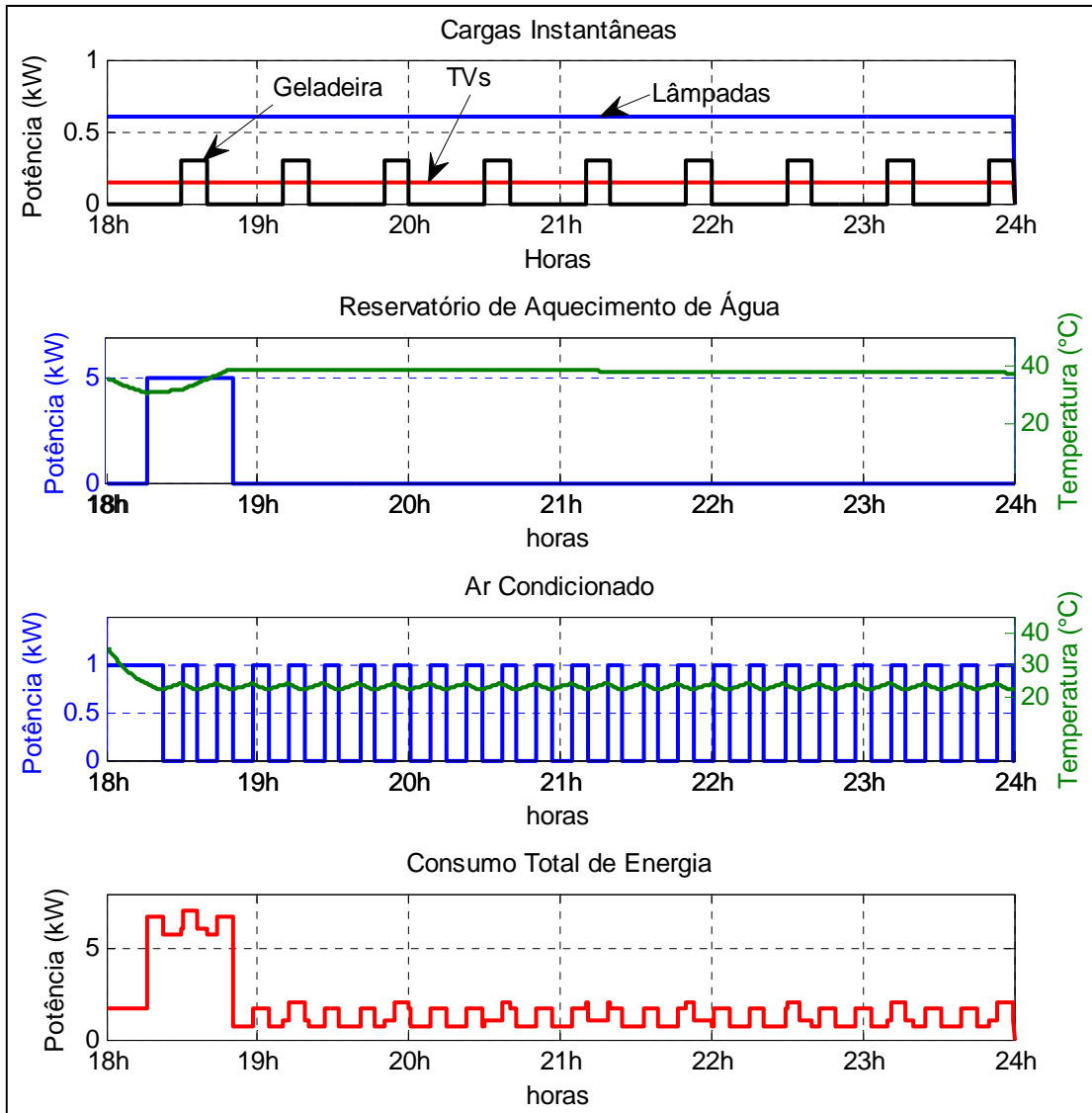


Figura 24 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, sem limitador de demanda utilizando o CDBP, a partir das 18h.

Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente foi realizada novamente a simulação com o controlador de demanda parametrizado em 5 kW. Na Figura 25 é apresentado o resultado da simulação para as primeiras 7 horas. É possível observar novamente no início da simulação a necessidade de ligar o aquecimento de água e o ar condicionado em um mesmo período para manter os níveis de conforto do usuário. Porém o acionamento das duas cargas em um mesmo período irá gerar um consumo que ultrapassa o limite de demanda desejado de 5 kW. Dessa forma, o CDBP desloca o acionamento do aquecimento de água, que possui prioridade menor, para um período em que o ar condicionado não está acionado. É possível se observar que o CDBP mantém a demanda abaixo do limite de 5 kW, porém o acionamento do aquecimento de água nos períodos em que o ar condicionado está desligado resulta em um tempo mais longo para a

temperatura da água atingir o valor desejado. Também se observa que durante a segunda vazão, a temperatura da água fica abaixo do nível inferior desejado de temperatura de 37°C, durante quase todo o período de acionamento.

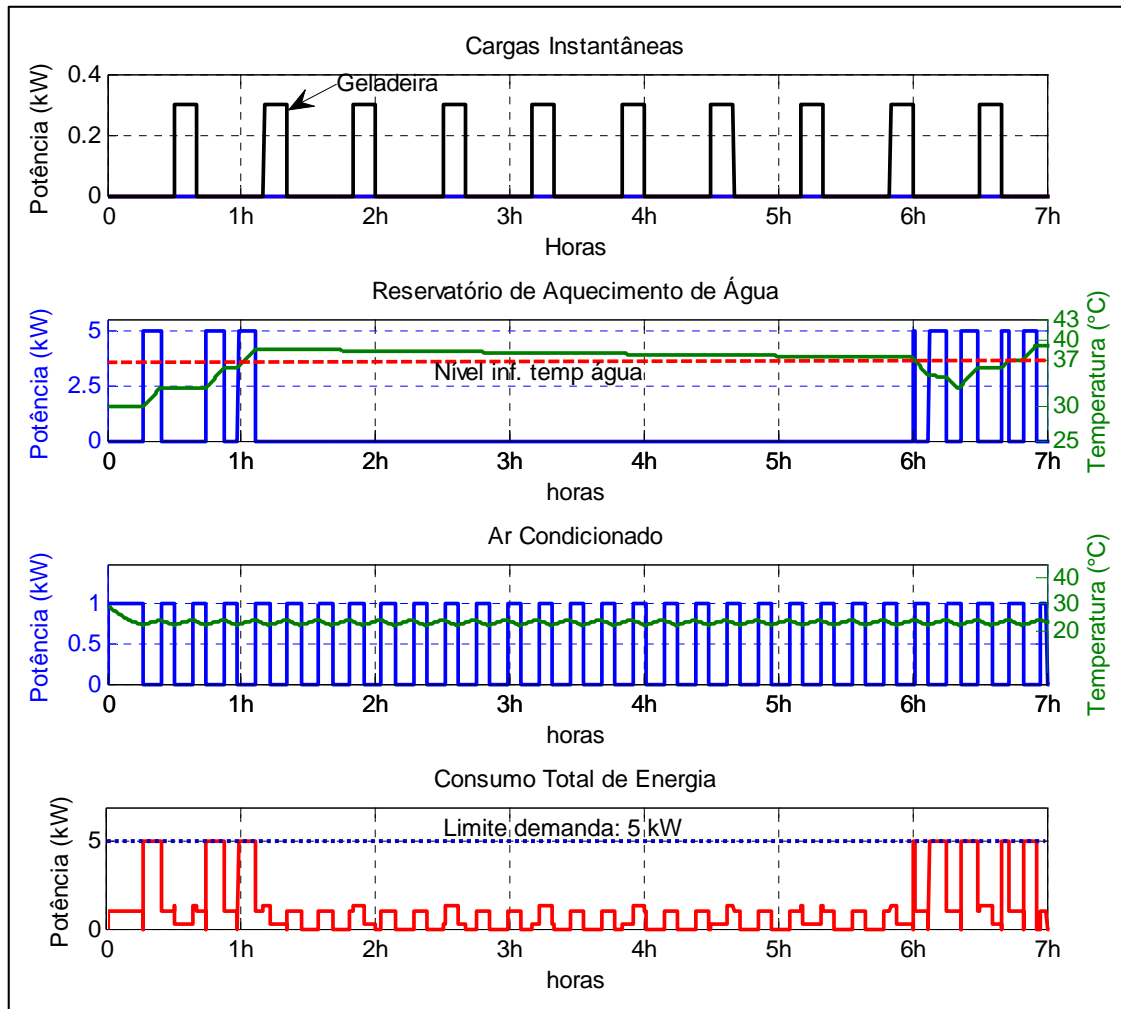


Figura 25 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDBP, primeiras 7 horas de simulação.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 26 é apresentado o resultado da simulação a partir das 18 horas, observa-se que a temperatura da água cai para o valor de aproximadamente 27°C, porém o aquecimento de água não é acionado pelo CDBP pois isso causaria a ultrapassagem do limite de demanda. Dessa forma o usuário não consegue utilizar a água para banho em uma temperatura adequada prejudicando seu conforto. O mesmo ocorre caso seja parametrizado o limitador de demanda em 4 kW, porém o aquecimento de água não é ligado durante todo o período de simulação de 24 horas causando desconforto aos usuários devido ao não aquecimento da água. Dessa forma constatou-se que para o CDBP a demanda mínima

possível de ser configurada deve ficar acima de 4 kW, pois neste valor de limite não é possível utilizar o CDBP sem com que haja prejuízos de conforto aos usuários.

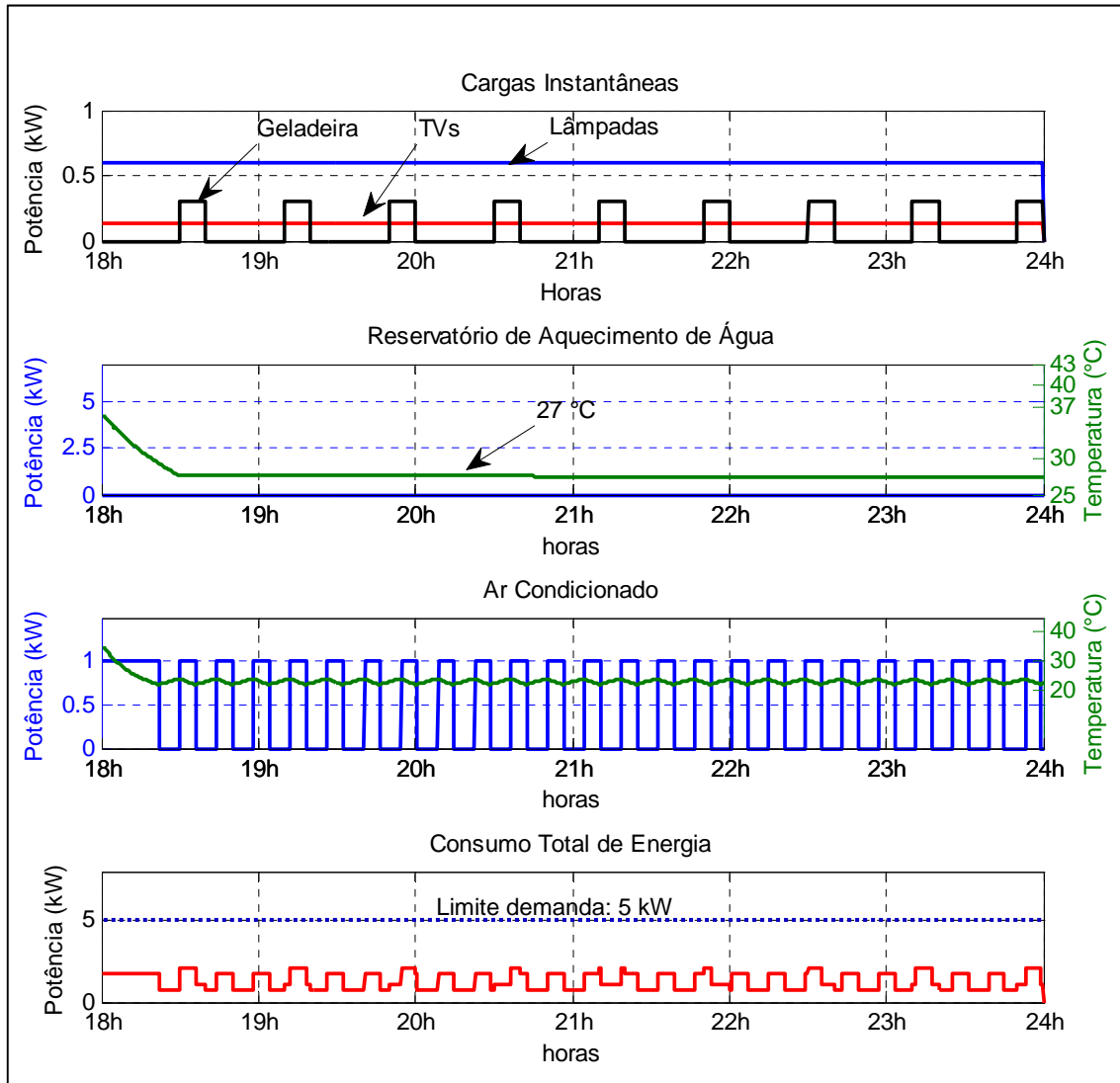


Figura 26 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDBP, a partir das 18h.
Fonte: Autoria Própria.

Durante as primeiras 7 horas das simulações com o limitador ligado e desligado, ocorreram dois períodos em que o aquecimento de água e o ar condicionado foram acionados juntos. Conforme mostrado anteriormente o primeiro período ocorreu no início da simulação, e o segundo período ocorreu a partir das 18 horas. Para fins de comparação na Figura 27 é exibido o tempo em que o aquecimento de água ficou acionado para que a temperatura da água atingisse o valor desejado de conforto. Observa-se que no primeiro acionamento com o limitador desligado levou 25,15 minutos para a temperatura atingir o valor desejado, e com o limitador ligado em 5 kW levou 50 minutos. Com o limitador em 4 kW o aquecimento de

água não é ativado. No segundo acionamento o tempo para se atingir o valor desejado de temperatura com o limitador ativo em 5 kW (55 minutos) também é quase o dobro quando comparado com o tempo para o limitador desligado (27 minutos). Novamente com o limitador em 4 kW, não é ativo o aquecimento de água.

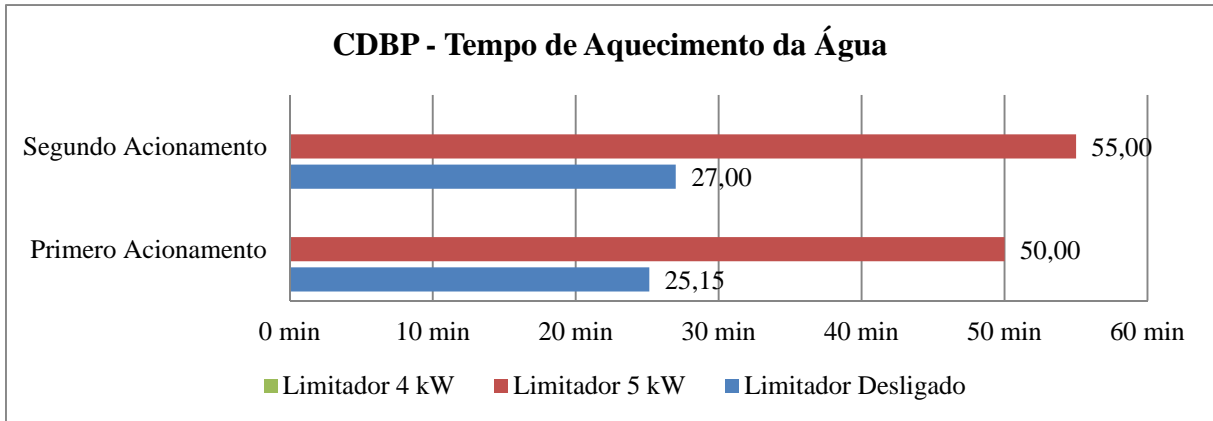


Figura 27 - Tempo para aquecimento de água no CDBP.
Fonte: Autoria Própria.

O tempo para que a temperatura ambiente atingisse o valor de conforto parametrizado se manteve o mesmo para todos os cenários simulados anteriormente conforme apresentado na Figura 28. Isso ocorreu devido ao ar condicionado ter sido parametrizado com maior prioridade em todas as simulações, e dessa forma teve seu acionamento com a potência total em todos os casos. No primeiro acionamento se levou 16,7 minutos para se atingir o valor de temperatura ambiente desejado e no segundo acionamento foram necessários 6 minutos. No primeiro acionamento do ar condicionado foi necessário mais tempo pois a temperatura ambiente estava mais elevada, aproximadamente 30°C. No segundo acionamento foi preciso um tempo menor pois a temperatura ambiente estava mais próxima da desejada.

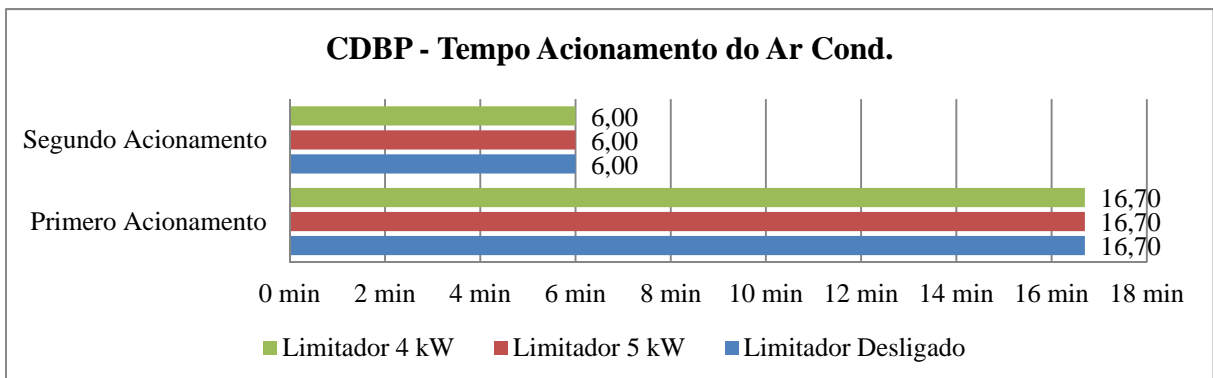


Figura 28 - Tempo de acionamento do ar condicionado.
Fonte: Autoria Própria.

O consumo de energia para as simulações realizadas está apresentado na Figura 29. Verifica-se que com o limitador em 5 kW e 4 kW o consumo de energia é menor quando comparado com o consumo com o limitador desligado. Esta diferença ocorre porque com o limitador em 5 kW o aquecimento de água não é mais acionado a partir das 18h, e com o limitador em 4 kW o aquecimento de água não é acionado em nenhum momento durante a simulação.

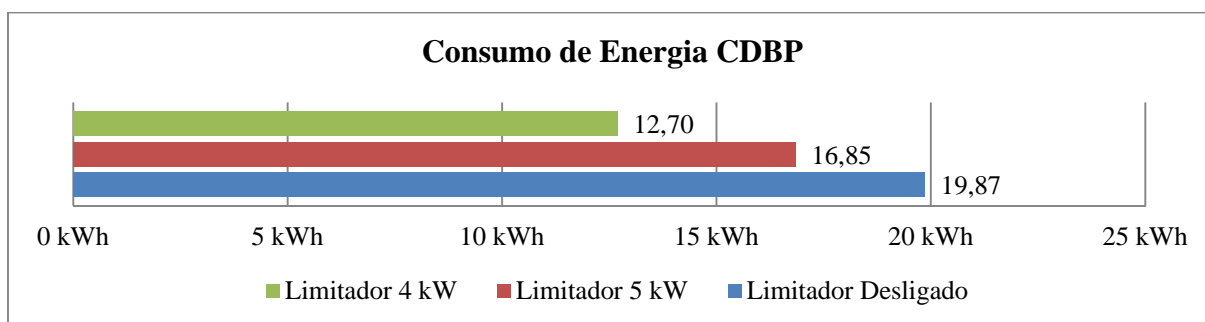


Figura 29 - Consumo de energia CDBP.
Fonte: Autoria Própria.

Também foram realizados ensaios com as prioridades invertidas, ou seja, prioridade maior para o aquecimento de água e menor para o ar condicionado. Os resultados dos ensaios não são apresentados aqui, pois o comportamento do algoritmo de controle de demanda foi o mesmo que para os ensaios apresentados anteriormente, em que o ar condicionado possui prioridade maior que o aquecimento de água. Com a prioridade maior priorizada para o aquecimento de água e o limite de demanda em 5 kW, o algoritmo de controle somente realizou o acionamento do ar condicionado nos períodos em que o aquecimento de água não estava ativo.

Observa-se nos resultados das simulações que o CDBP mantém a demanda de energia abaixo do limite, porém o conforto do usuário pode ser prejudicado, pois quando o limitador está ativo, o tempo de aquecimento de água pode ser o dobro quando comparado com o tempo de aquecimento com o limitador desativado. Também verifica-se que para um limite de demanda de 4 kW o controlador pode apresentar funcionamento insatisfatório visto que nesta condição não é possível se realizar a ativação de aquecimento de água. Esse comportamento do controlador ocorre porque nesse tipo de estratégia de controle são considerados apenas os estados ligado e desligado da carga, e quando é necessário o acionamento de uma carga que poderá causar a ultrapassagem do limite de demanda, o controlador impede que a carga seja ativada. Uma estratégia de controle de demanda mais

eficiente consiste em um método que possibilite ativar o aquecimento de água e o ar condicionado em um mesmo período sem ultrapassar o limite de demanda.

3.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a implementação e simulação de um algoritmo de controle de demanda discutido na literatura. Este algoritmo é baseado em prioridades das cargas e considera apenas os estados ligado e desligado das aplicações.

O princípio do algoritmo analisado considera que ao ocorrer a necessidade de acionamento de duas cargas no mesmo período, que ultrapassagem do limite de demanda, o CDBP não aciona a carga menos prioritária. Analisando os resultados observou-se que isso pode causar desconforto para os usuários, pois no caso do aquecimento de água, a temperatura desejada da água necessita um longo tempo para ser atingida, ou no caso em que o aquecimento não ativado em nenhum período do dia, a temperatura da água decai devido as perdas do ambiente.

4 CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO (CDA)

No capítulo anterior foi apresentado um algoritmo de controle de demanda baseado em prioridades. Conforme análise apresentada o referido algoritmo pode apresentar problemas relacionados ao conforto do usuário para garantir demanda abaixo de determinado limite. Neste capítulo é apresentado um novo algoritmo para controle de demanda. O algoritmo proposto emprega o conceito de acionamento gradual da carga para atender o limite de demanda reduzindo os problemas citados acima.

O algoritmo de controle de demanda adaptativo (CDA) que se apresenta nesta seção foi desenvolvido utilizando o método de busca de Rosenbrock (MORENO-EGUILAZ, CIPOLLA, *et al.*, 1997). Este algoritmo permite que as cargas sejam ativadas em um mesmo período adaptando-se a potência de cada uma de forma que a demanda de energia da residência não ultrapasse o limite desejado.

Ao utilizar o método de busca Rosenbrock a potência das cargas é incrementada ou decrementada em pequenos degraus, até que a busca se aproxime de um valor de potência máxima total da residência sem ultrapassar o limite de demanda. O método é definido matematicamente pela equação (21).

$$U(n) = \begin{cases} U(n-1) + k\Delta U(n-1) & \begin{cases} DR < LDI & k = 1 \\ DR > LDS & k = -1/2 \end{cases} \\ U(n-1) & \{ LDI < DR < LDS \end{cases} \quad (21)$$

Em que $\Delta U(n-1)$ é definido pela equação (22), foi utilizado ΔU inicial com valor de 0,05.

$$\Delta U(n-1) = |U(n-1) - U(n-2)| \quad (22)$$

Se a demanda total de energia (DR) for menor que o limite de demanda inferior (LDI) o método realiza incrementos de um degrau ($k=1$) na potência sempre na mesma direção de busca, caso a demanda de energia ultrapasse o limite superior (LDS) o método realiza decrementos de meio degrau ($k=-1/2$) na direção contrária da busca. O processo segue esta metodologia reduzindo sucessivamente o incremento/decremento a cada alteração da direção de busca. A partir do momento em que o valor de potência total da residência se

estabeleça dentro uma faixa que é delimitada entre o limite de demanda superior e inferior, o procedimento de busca é finalizado e o sinal de controle é mantido o mesmo até que seja necessário se realizar uma nova busca. Na Figura 30 é possível se observar a forma de busca realizada pelo CDA utilizando o método de busca Rosenbrock. No exemplo apresentado o limite de demanda foi configurado em 2 kW e demonstra o acionamento gradual do resistor de aquecimento de água.

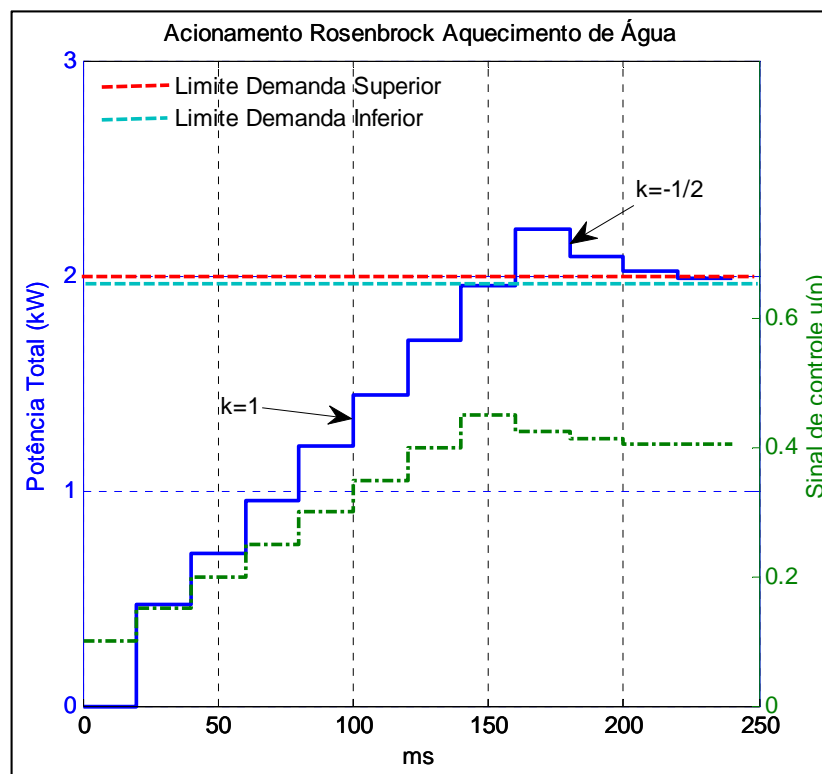


Figura 30 - Busca baseada no método Rosenbrock.
Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 5 são apresentadas as interações do algoritmo de busca Rosenbrock apresentado na Figura 30.

Tabela 5 - Valores de interação do algoritmo de busca Rosenbrock.

Tempo (ms)	Sinal de Controle u(n)	Potência Total (kW)
0	0,1	0
20	0,15	0,5
40	0,2	0,7
60	0,25	0,1
80	0,3	1,2
100	0,35	1,5
120	0,4	1,7
140	0,45	2
160	0,425	2,25
180	0,4125	2,12
200	0,40625	2,06
220	0,40625	1,98
240	0,40625	1,98

Fonte: Autoria Própria.

4.1 PRIORIDADE DAS CARGAS E PARÂMETROS DE PREFERÊNCIA

Para se executar o método de busca de potência nas cargas, foram utilizados os mesmo parâmetros de prioridade e de conforto do usuário apresentados na Tabela 3, no Capítulo 3. Ao ocorrer o pedido de ativação de uma carga, a carga de maior prioridade é ativada em 100% de sua potência e a carga de menor prioridade é ativada de forma incremental através do método de busca.

4.2 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS CARGAS

A estratégia de operação das cargas utilizando o método de busca, foi implementada conforme as equações apresentadas anteriormente, porém se diferenciando quanto a forma de acionamento das cargas. O acionamento das cargas nas equações (19) e (20) é realizado considerando apenas dois estados (0 = desligado e 1 = ligado). No controle de demanda utilizando o método de busca, as cargas são acionadas gradualmente conforme a disponibilidade de demanda no momento de sua ativação, podendo assumir diversos valores entre seus estados desligado e ligado.

4.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE DEMANDA

As estratégias de operação das cargas do CDA foram implementadas conforme apresentado no fluxograma da Figura 31. Inicialmente a função verifica diversos parâmetros, sendo que a verificação da potência nominal das cargas não é mais necessária. A estratégia de controle de demanda implementada não utiliza esse parâmetro para realizar a busca de potência, pois a potência da carga é incrementada ou decrementada em função do limite de demanda disponível e não em razão da potência de operação de cada carga. Após verificar os parâmetros iniciais são executadas as funções de controle de temperatura da água e temperatura ambiente, para cada carga foi implementada uma função de controle de demanda que é executada quando ocorre a violação de alguns dos níveis de conforto do usuário. Após ser executada alguma das funções de controle de demanda, retorna-se para as funções de operação das cargas.

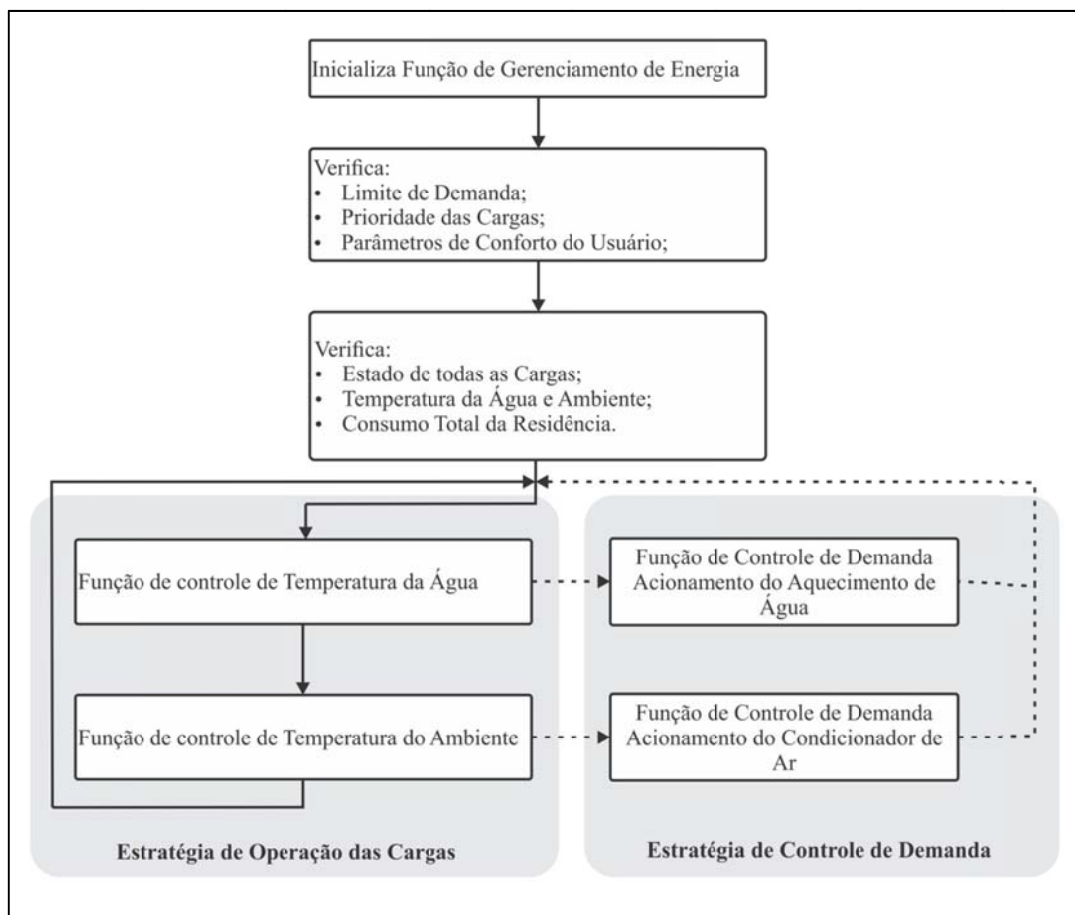


Figura 31 - Fluxograma da estratégia de operação de cargas do CDA.
Fonte: Autoria Própria.

O fluxograma da função de controle do CDA pode ser visualizado na Figura 32. Ao ser solicitado acionamento de alguma carga a função é chamada, inicialmente é verificado se a prioridade da carga que solicitou acionamento (Carga A) é maior que a prioridade da outra carga controlada (Carga B).

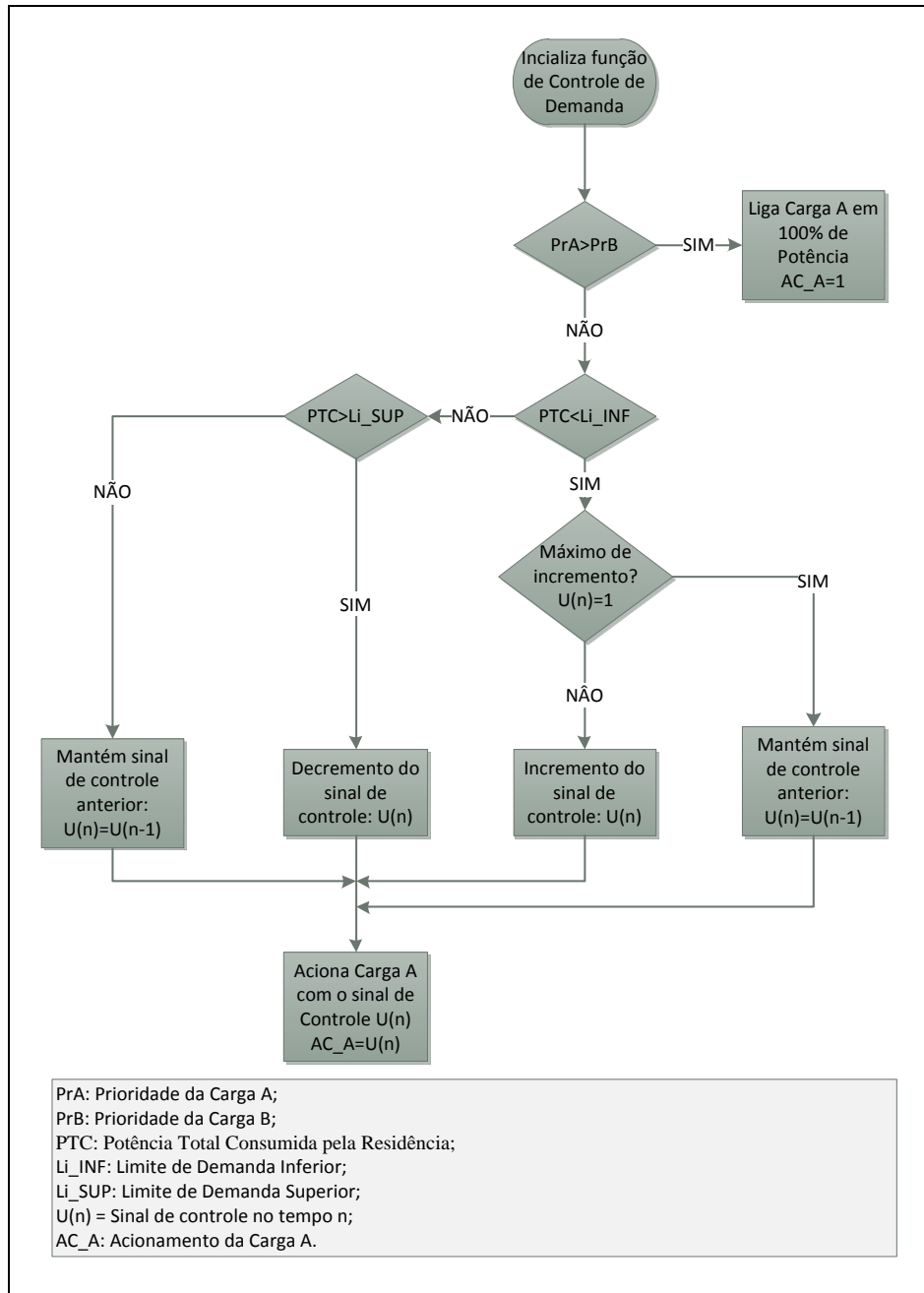


Figura 32 - Fluxograma Função do CDA.
Fonte: Autoria Própria.

Caso a prioridade da carga A for maior que da Carga B, a Carga A é acionada com 100% de sua potência, caso tenha prioridade menor é realizado o método de busca de

potência. Na sequência a função verifica se a potência total consumida pela residência (PTC) é menor que o limite de demanda inferior (Li_INF), caso seja, então a função passa a incrementar o sinal de controle. Porém antes do incremento é verificado se o sinal de controle já foi incrementado ao seu máximo ($U(n)=1$), se sim, a função irá manter o sinal de controle igual ao estado anterior, pois a carga pode ter sua potência incrementada ao máximo (100% de carga) sem atingir o limite de demanda inferior. Se ao realizar o incremento, a potência total da residência ultrapassar o limite de demanda inferior, um novo teste é realizado, sendo verificado se a potência total da residência ultrapassou o limite de demanda superior (Li_SUP), se sim, é realizado um decremento no sinal de controle ($U(n)$) afim de diminuir a potência da carga. Quando a potência total da residência não for menor que o limite de demanda inferior e nem maior que o limite de demanda superior, isto significa que a busca encontrou o valor desejado de sinal de controle ($U(n)$) que fica dentro dos limites de demanda, dessa forma a função mantém o valor de sinal de controle constante, ou seja, com o mesmo valor que o estado anterior.

4.5 SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO (CDA)

O algoritmo CDA, foi implementado no *Matlab Simulink* conforme apresentado no diagrama da Figura 33. O modelo é formado por cinco blocos principais: bloco parametrização, bloco residência, bloco CDA e blocos *Rate Transition*.

O bloco parametrização utilizado na estratégia CDA foi o mesmo utilizado nas simulações do CDBP, porém sem os parâmetros de potência nominal das cargas. Ao utilizar a busca Rosenbrock não é necessário informar a potência nominal das cargas, pois a estratégia utiliza o método de busca para encontrar a potência das cargas considerando o limite de demanda do instante da busca.

O bloco residência possui as mesmas entradas e saídas apresentadas anteriormente no algoritmo CDBP. O bloco CDA possui as estratégias apresentados na Figura 31 e Figura 32.

Nas simulações foram utilizadas diferentes taxas de amostragens para os blocos residência e CDA, dessa forma foi necessário a utilização dos blocos *Rate Transition*. O bloco *Rate Transition* permite a transferência de dados da saída de um bloco operando em uma taxa amostragem para a entrada de outro bloco com taxa de amostragem diferente.

Com exceção as informações de potência nominal, os parâmetros utilizados na simulação do CDA foram os mesmos apresentados na Tabela 4.

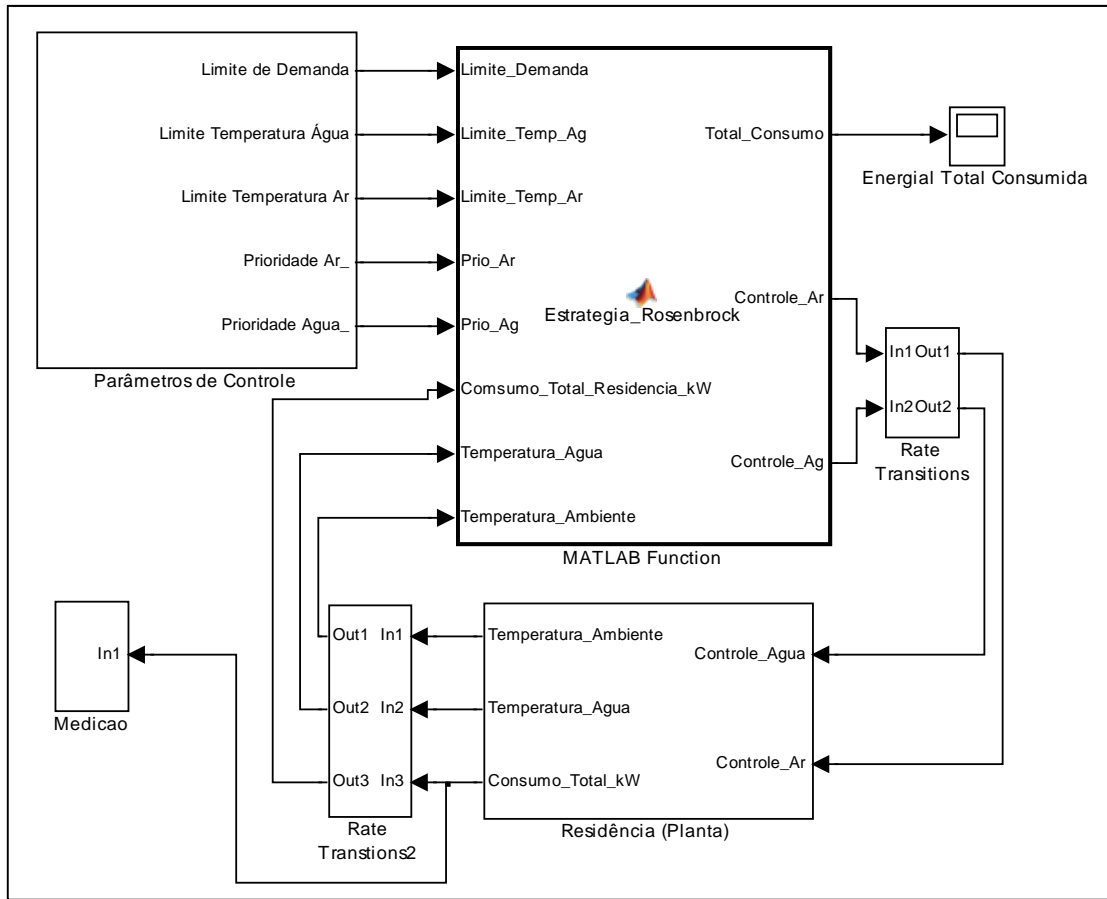


Figura 33 - Modelo Simulink do CDA.
Fonte: Autoria Própria

Inicialmente a simulação foi realizada sem atuação do controlador de demanda o resultado obtido não apresentou diferenças significativas quando comparado ao resultado obtido na simulação do CDBP sem o atuador de limite de demanda apresentado na Figura 23.

Posteriormente a simulação foi realizada com limitador de demanda configurado em 5 kW, na Figura 34 são apresentados os resultados para as primeiras 7 horas de simulação.

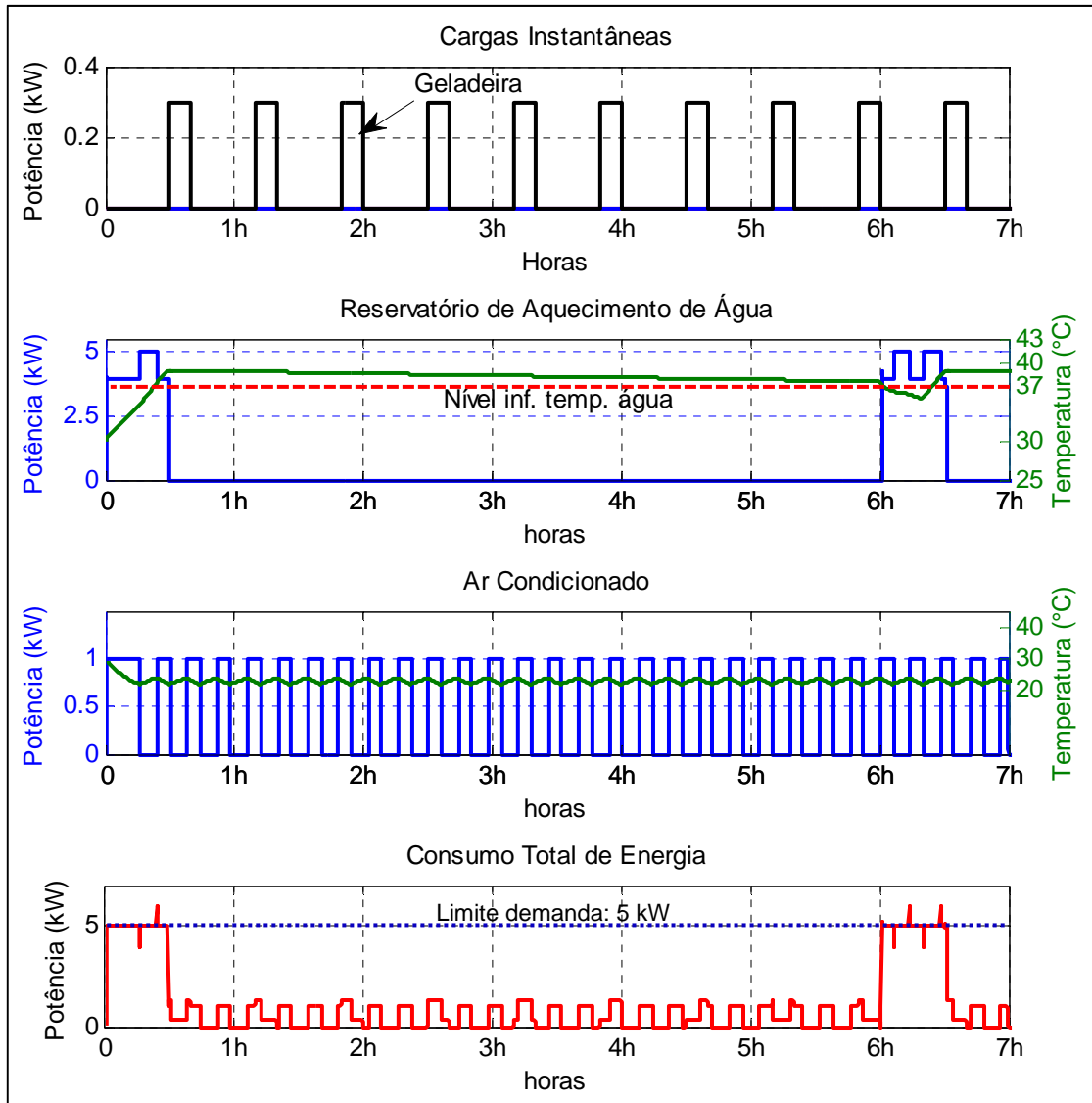


Figura 34 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDA, primeiras 7 horas de simulação.
Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, na Figura 34 é possível se observar o acionamento do aquecimento de água e do ar condicionado em mesmos períodos sem com que ocorra a ultrapassagem do limite de demanda. Isto é possível pois o aquecimento de água, que é carga menos prioritária, é acionado de forma gradual e opera em um valor intermediário entre seu mínimo e máximo de valor de potência. Durante as primeiras sete horas de simulação verifica-se a existência de dois períodos em que as cargas (aquecimento água e ar condicionado) foram ativadas juntas. O primeiro período ocorre logo no início da simulação, a potência de aquecimento de água é incrementada até o valor de aproximadamente 3,9 kW enquanto a potência do ar condicionado se encontra em 1 kW. Dessa forma a demanda da residência fica menor que o limite de 5 kW. Ainda neste primeiro período verifica-se que ao ser desligado o ar

condicionado, o aquecimento de água é incrementado até o valor de 4,9 kW para utilizar o 1 kW que estava sendo consumido anteriormente pelo ar condicionado. Em seguida no próximo acionamento do ar condicionado ocorre a violação do limite de demanda, pois neste momento o aquecimento de água se encontra com 4,9 kW e ao ser acionado o ar condicionado são adicionados mais 1kW, totalizando a demanda de 5,9 kW. Este pico de violação é uma característica do algoritmo de controle e não prejudica o usuário, pois possui duração média de 1 segundo.

O segundo período de acionamento das duas cargas ocorre a partir das 6 horas e é apresentado um comportamento semelhante ao primeiro período. Quando o ar condicionado está ativo, o aquecimento de água fica com potência de 3,9 kW e quando o ar condicionado é desativado a potência da água é incrementada até 4,9 kW.

Na Figura 35 é apresentado o resultado da simulação a partir das 18 horas. É possível se observar que mesmo com o limitador atuando, a potência de aquecimento de água é ativada em momentos que outras cargas mais prioritárias estão ativas. Este comportamento se difere do que foi apresentado na simulação do CDBP a partir das 18h na Figura 26, em que o aquecimento de água não foi ativado para se evitar a ultrapassagem do limite de demanda, causando desconforto dos usuários devido ao não aquecimento da água. No CDA a partir das 18 horas o aquecimento de água é ativado quando necessário e dessa forma é mantido o nível de temperatura da água para se utilizar em banhos sem prejudicar o conforto do usuário. Ainda no CDA mesmo com o acionamento do aquecimento de água o limite de demanda é respeitado. Observa-se que no início da simulação na Figura 35 ocorre o acionamento do aquecimento de água em período que em que o ar condicionado, os televisores e as lâmpadas estão acionadas. Para se evitar que a demanda de energia ultrapasse o limite, o aquecimento de água é incrementado até a potência de 3,2 kW enquanto os televisores consomem 0,14 kW, as lâmpadas 0,6 kW e o ar condicionado 1 kW, totalizando uma demanda de 4,94 kW na residência. Aproximadamente as 18h30m é acionada a geladeira com consumo de 0,3 kW, neste momento a potência de aquecimento de água é decrementada até o valor 2,9 kW, evitando com que a demanda ultrapasse o limite.

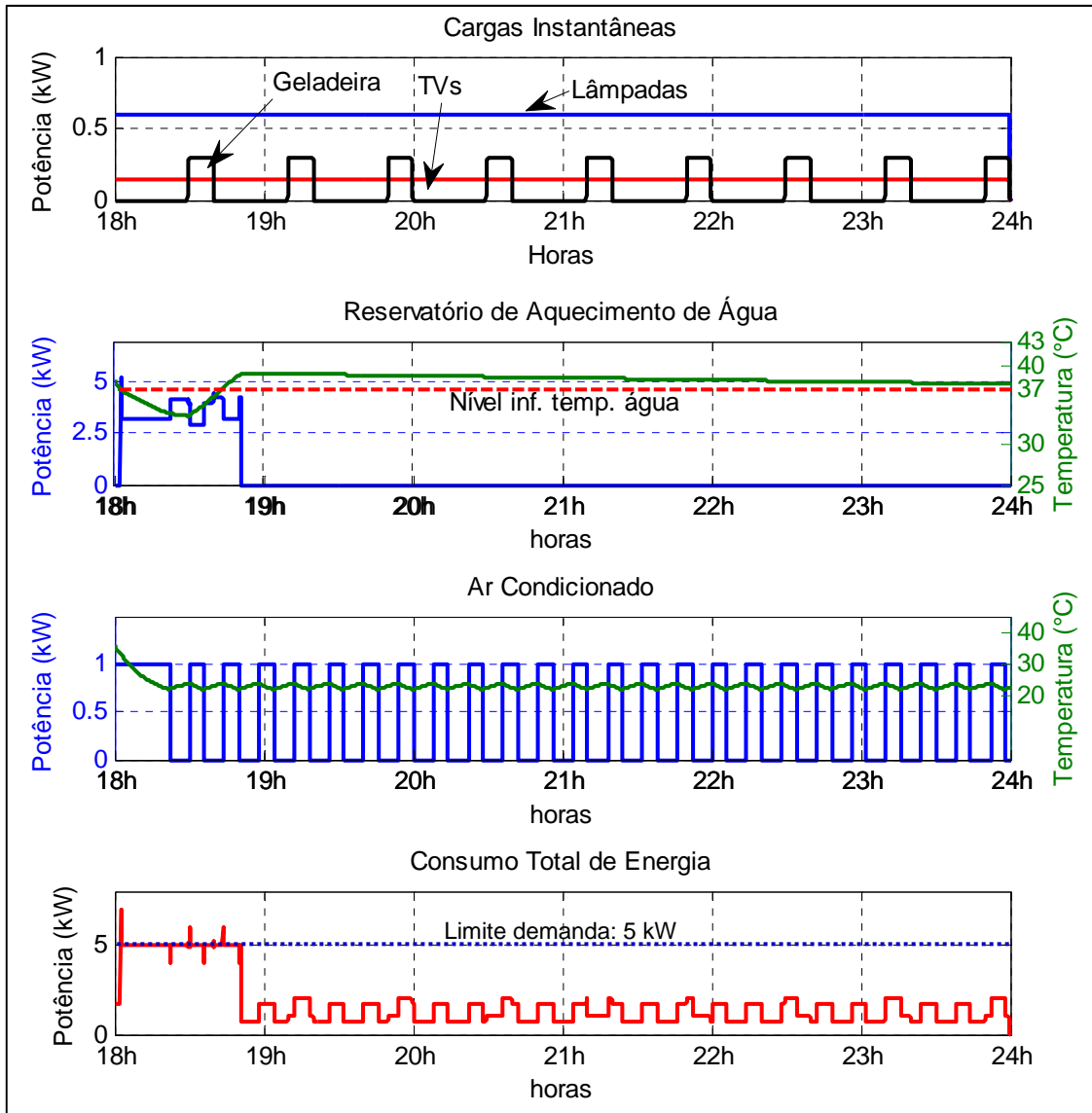


Figura 35 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDA, a partir das 18h.

Fonte: Autoria Própria.

A simulação foi realizada novamente com o limite de demanda parametrizado em 4 kW. O CDA apresentou um comportamento semelhante ao apresentado para a simulação com o limitador parametrizado em 5 kW. O CDA com o limitador em 4 kW diferenciou-se do CDA em 5kW quanto ao valor de incremento da potência de aquecimento de água, que apresentou um valor menor para evitar a ultrapassagem do limite de demanda. Um dos resultados mais relevantes, é observado ao se comparar a simulação do CDA em 4 kW com o resultado da simulação do CDBP em 4kW. No CDBP o limite mínimo de demanda que pode ser parametrizado em que o controlador atua de forma satisfatória foi de 5 kW, abaixo desse valor o controlador não aciona o aquecimento de água em nenhum momento durante simulação pois isso causaria a ultrapassagem do limite de demanda, dessa forma o usuário tem o conforto

prejudicado pois a água não é aquecida. O CDA com limitador em 4 kW aciona o aquecimento de água e também mantém a demanda de energia abaixo do limite preestabelecido. Nas simulações foi verificado que o limite mínimo de demanda que pôde ser configurado no CDA foi de 3 kW, abaixo desse valor o CDA apresentou uma operação insatisfatória visto que não conseguiu manter valores de temperatura dentro dos níveis de conforto dos usuários.

Na Figura 36 é apresentado um comparativo do tempo de aquecimento de água para os acionamentos do resistor de aquecimento que ocorreram nas primeiras 7 horas de simulação. Foram dois acionamentos realizados em períodos que o ar condicionado também estava ativo. Observa-se que para o primeiro acionamento a diferença entre o tempo de aquecimento com limitador desligado e o limitador em 5 kW foi de 4 minutos. No segundo acionamento essa diferença foi de 2 minutos. Com o limitador em 4 kW no primeiro acionamento a diferença foi de 12 minutos e no segundo acionamento a diferença foi de 10 minutos.

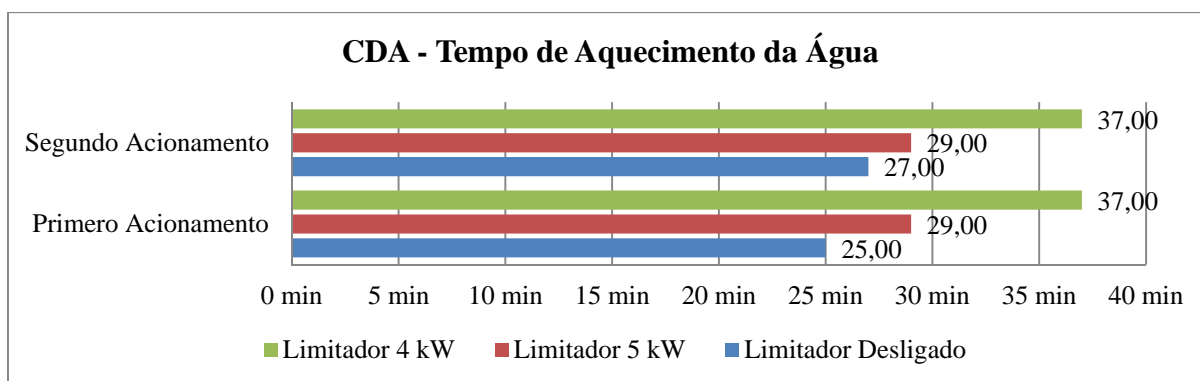


Figura 36 - Tempo para aquecimento de água no CDA.
Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma observa-se que o tempo para que a água atinja a temperatura desejada é muito próximo quando se compara o CDA com o limitador desligado ao CDA com o limitador atuando em 5 kW ou 4 kW. Ainda, é possível se verificar nos resultados das simulações do CDA que a temperatura viola o nível inferior de conforto dos usuários, porém este tempo de violação é menor quando comparado com o tempo de violação do CDBP. Dessa forma o conforto do usuário pode ser mantido mesmo com e atuação do controlador de demanda.

Da mesma forma que apresentando anteriormente no CDBP, o tempo para que a temperatura ambiente atingisse o valor de conforto parametrizado, foi de 16,7 minutos no

primeiro acionamento e de 6 minutos no segundo acionamento para todos os cenários simulados. Novamente em todas as simulações foi considerado o ar condicionado com prioridade maior que do aquecimento de água, e de dessa forma o ar condicionado foi ativado com sua potência máxima durante as simulações.

O consumo de energia do CDA é apresentado pela Figura 37. Verifica-se que o consumo foi aproximadamente o mesmo para as três simulações. Isso ocorre porque todas as cargas são ativadas durante as simulações, porém a ativação do aquecimento de água é realizada de forma gradual e evita picos de consumo que ultrapassem o limite de demanda.

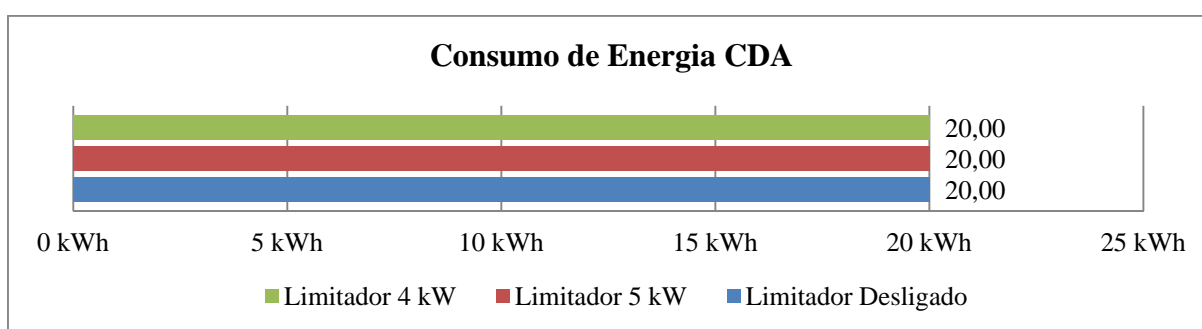


Figura 37 - Consumo de energia CDA.

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados das simulações do CDA, apresentam que o controlador evita picos de demanda que ultrapassem o limite parametrizado e também mantém os níveis de conforto do usuário. Isso é possível devido a estratégia utilizada no CDA que possibilita o acionamento de todas as cargas durante um mesmo período evitando a ultrapassagem do limite de demanda. Nesta estratégia foi considerado níveis de prioridade, a carga mais prioritária é ativada com sua potência total e a carga menos prioritária é ativada de forma gradual. Outra abordagem para essa estratégia é o acionamento gradual das duas cargas, essa abordagem é apresentada a seguir.

4.6 CONTROLADOR DE DEMANDA ADAPTATIVO PONDERADO (CDAP)

Anteriormente foi apresentado o CDA que permitiu o acionamento gradual de apenas uma carga enquanto a outra carga do ensaio era ativada em apenas dois estados (Ligado/Desligado). Porém atualmente cresce a tendência de utilização de equipamentos residenciais que operam de forma gradual como aparelhos de ar condicionado e refrigeradores do tipo *inverter*, bem como aquecedores de água. Dessa forma pode se tornar necessária a

operação gradual de mais de uma carga em uma residência. Nesta sessão apresenta-se um algoritmo de demanda que permite o acionamento gradual de mais de uma carga utilizando o método de busca Rosenbrock. Este tipo de acionamento oferece mais flexibilidade no controle de demanda pois o usuário pode definir ganhos independentes para as cargas conforme sua necessidade. Como por exemplo, o usuário pode parametrizar para que durante a atuação do limitador de demanda, uma carga opere em 30% de potência enquanto outra carga opere em 70% de potência. Esta flexibilidade não era alcançada no algoritmo apresentado anteriormente (CDA) em que pelo menos uma carga sempre operava em 100% de potência ao ser acionada com o limitador de demanda ativo.

O controlador de demanda adaptativo ponderado (CDAP) que se apresenta nesta sessão possibilita o acionamento gradual de duas cargas (aquecimento de água e ar condicionado) em um mesmo período sem ultrapassar o limite de demanda parametrizado. É utilizado o método de busca Rosenbrock para se determinar o valor ponderado de potência para cada carga.

Durante a busca Rosenbrock no CDAP, varia-se o tamanho do degrau de incremento ou decremento da potência de cada carga. Na Figura 38 é exibido o acionamento do aquecimento de água e do ar condicionado em um mesmo período. É possível se visualizar que o degrau de incremento do aquecimento da água é maior que o degrau de incremento do ar condicionado, dessa forma o aquecimento de água é acionado com uma potência maior que o ar condicionado.

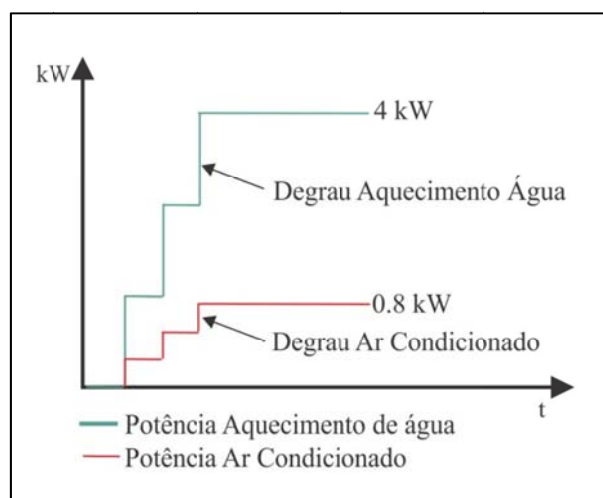


Figura 38 – Degraus de acionamento para o aquecimento de água e do ar condicionado.
Fonte: Autoria Própria.

Para se calcular o valor do degrau são considerados dois fatores: o erro percentual de conforto e o ganho da carga. O erro percentual de conforto é calculado através da diferença entre o valor parametrizado de temperatura e o valor de temperatura atual, sendo que quanto maior for a porcentagem de erro maior será o incremento de potência. Dessa forma a carga que está mais longe de atingir o valor de temperatura desejado receberá incrementos maiores enquanto a carga que estiver mais próxima do valor de temperatura desejado receberá incrementos menores de potência.

O outro parâmetro que determina o tamanho do degrau é o ganho de carga. Para cada carga é possível se parametrizar um ganho e dessa forma o usuário pode priorizar uma carga em detrimento da outra. Assim, é possível se determinar que uma carga tenha incrementos de potência maior que a outra mesmo que o erro percentual de conforto seja pequeno.

Na equação (23) é apresentado o cálculo do erro percentual do aquecimento de água ($ErAgPerc$) em que $ErAg$ é o erro de temperatura da água, T_{setAQ} é o valor parametrizado de temperatura da água e o GAg é o ganho de carga para o aquecimento de água.

$$ErAgPerc = \left(\frac{ErAg}{T_{setAQ}} \right) \times GAg \quad (23)$$

Na equação (24) é apresentado o cálculo do erro percentual para a temperatura ambiente ($ErArPerc$) em que $ErAr$ é o erro de temperatura ambiente, T_{setAC} é o valor parametrizado de temperatura para o ar condicionado e o GAr é o ganho de carga para o ar condicionado.

$$ErArPerc = \left(\frac{ErAr}{T_{setAC}} \right) \times GAr \quad (24)$$

Após serem calculados os dois erros percentuais, é encontrado o erro total através da equação (25).

$$ErTOTAL = ErAgPerc + ErArPerc \quad (25)$$

Através dos erros percentuais das cargas e do erro total, se determina o tamanho do degrau para o aquecimento de água $\Delta UAg(n-1)$ (equação (26)) o tamanho do degrau para o acionamento do ar condicionado $\Delta UAr(n-1)$ (equação (27)).

$$\Delta UAg(n-1) = \frac{ErAgPerc}{(ErTOTAL \times 10)} \quad (26)$$

$$\Delta UAr(n-1) = \frac{ErArPerc}{(ErTOTAL \times 10)} \quad (27)$$

Para o ganho de carga foi determinado uma faixa de variação de valores de 0,1 a 1. Ao ocorrer o acionamento ponderado das cargas, ou seja, período em que as duas cargas são acionadas juntas, são calculados os valores de degraus de incremento de forma ponderada. Ao ocorrer o acionamento de apenas uma carga durante um período, o algoritmo utiliza um valor padrão de degrau de incremento configurado com o maior incremento possível para a carga.

O fluxograma do CDAP é apresentado na Figura 39. Inicialmente o programa executa as estratégias de operação das cargas, estas estratégias verificam se existe a necessidade de acionamento de alguma carga para se realizar a manutenção dos níveis de conforto dos usuários. Posteriormente são verificados os pedidos para acionamento das cargas provenientes da estratégia de operação das cargas. São verificadas todas as possíveis combinações entre o pedido de acionamento do aquecimento de água (Pc_Ag) e o pedido de acionamento do ar condicionado (Pc_Ar). Caso seja necessário acionar apenas uma carga durante um período, o CDAP se comporta semelhante ao CDA apresentado anteriormente. É acionada apenas a carga desejada executando a busca Rosenbrock utilizando um degrau de incremento padrão, sem os cálculos de ponderação de degrau. Porém caso seja necessário o acionamento de duas cargas em um mesmo período, o CDAP realiza o acionamento através da busca Rosenbrock utilizando a ponderação no tamanho do degrau de incremento das potências das cargas.

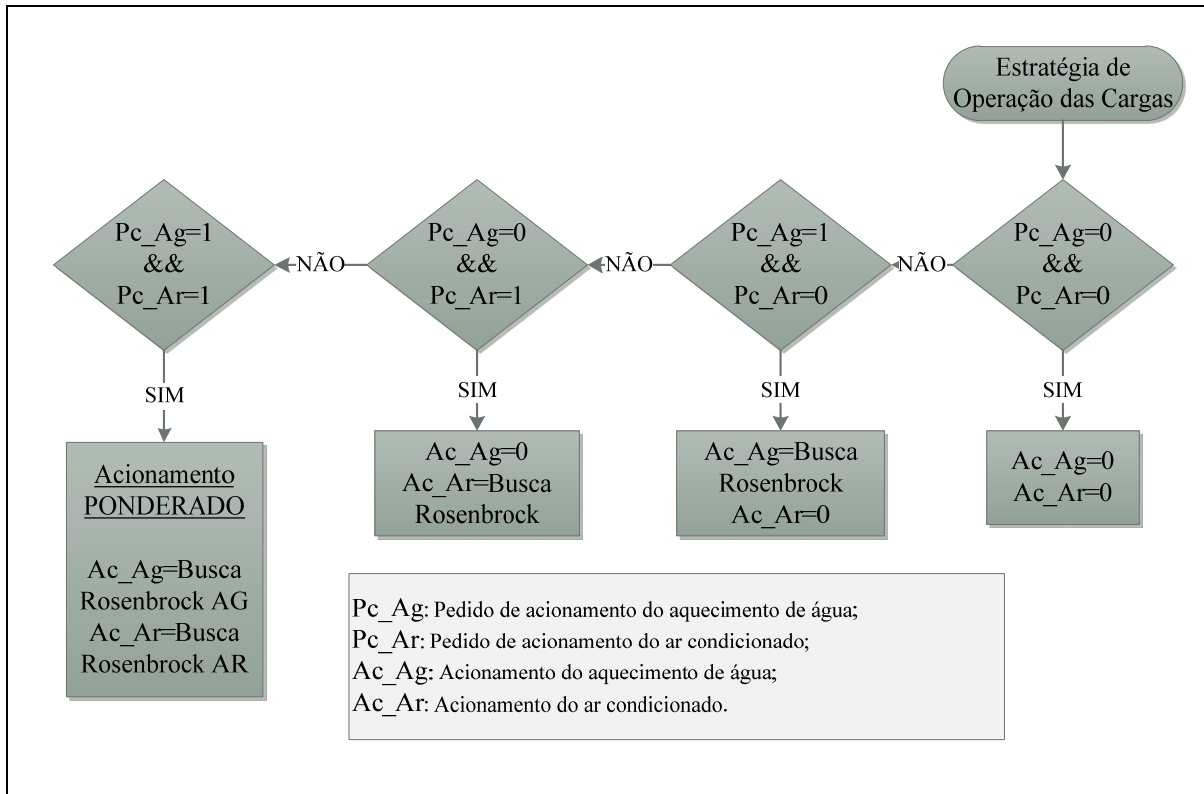


Figura 39 – Fluxograma do CDAP.
Fonte: Autoria Própria.

4.6.1 Simulação do CDAP

Inicialmente foram realizadas as simulações do CDAP com o limitador de demanda desativado, o comportamento da potência e acionamento das cargas foi muito semelhante aos resultados apresentados anteriormente nas simulações do CDBP com o limitador de demanda desativado, dessa forma o CDAP com o limitador desativado não é apresentado. Na sequência foram realizadas novas simulações com o CDAP parametrizado com o limitador em 5 kW. Foram realizadas três simulações, a primeira com o ganho de carga igual para as duas cargas, a segunda simulação com o ganho de carga maior para o aquecimento de água em relação ao ar condicionado, e na terceira simulação foi utilizando um ganho de carga maior para o ar condicionado em relação ao aquecimento de água.

Na primeira simulação foi utilizado um ganho de carga de 0,5 para as duas cargas, O resultado da simulação para as primeiras 7 horas é apresentado na Figura 40. Inicialmente é possível se observar que o limite de demanda de 5 kW não é ultrapassado ao longo do período simulado.

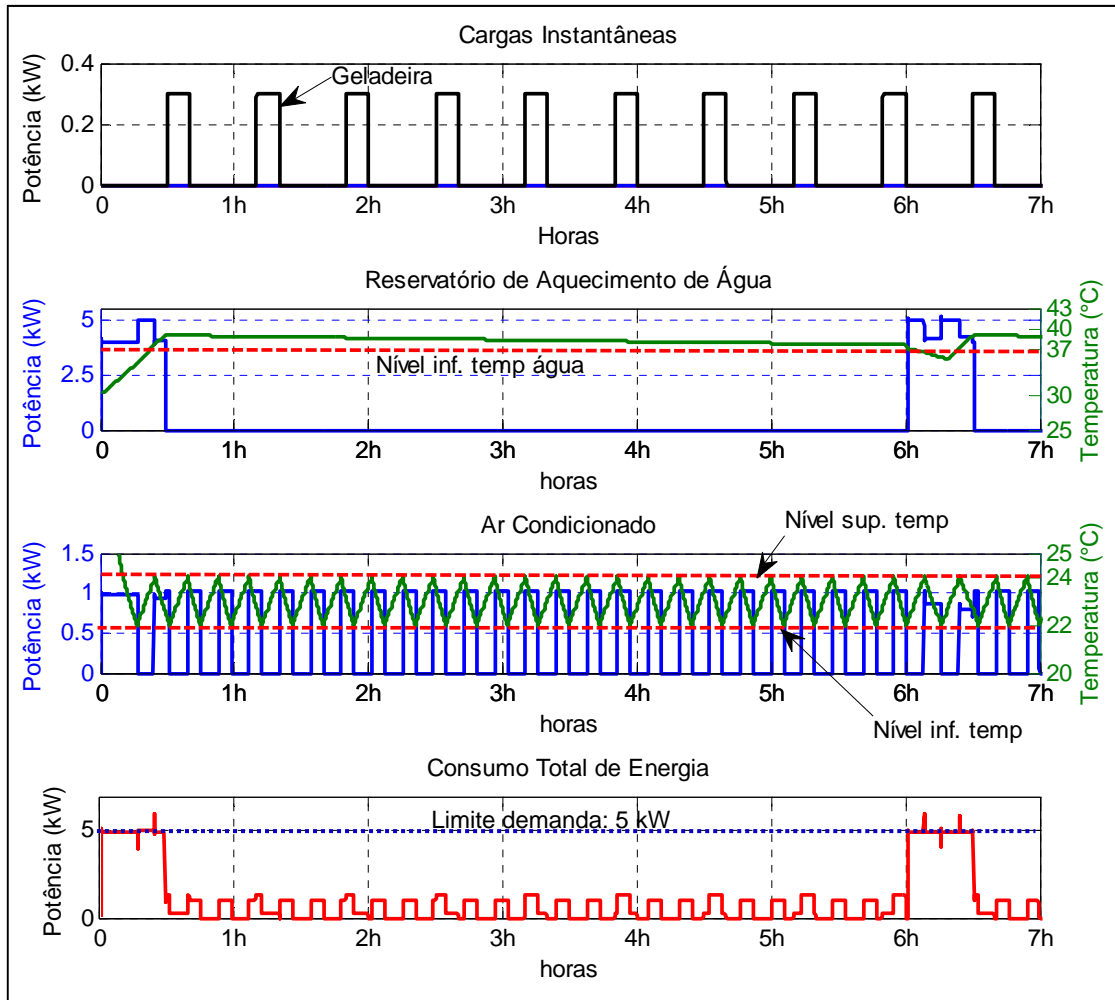


Figura 40 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganhos de carga iguais, primeiras 7 horas de simulação.
Fonte: Autoria Própria.

Ainda, observa-se que no início da simulação ocorre o acionamento das duas cargas em um mesmo momento, verifica-se que o aquecimento de água é acionado em 3,9 kW e o ar condicionado é acionado em 1 kW. Assim que o ar condicionado é desligado o aquecimento de água é incrementado para 5 kW. Na sequência quando ocorre novamente o acionamento do ar condicionado o aquecimento de água é decrementado para 4 kW e o ar condicionado é ativado em 0,9 kW. Na Figura 41 é apresentado resultado da simulação a partir das 18 horas, observa-se que apesar de o aquecimento de água estar ativo ocorre um período de violação no nível de conforto da água em que a temperatura caiu para um valor mínimo de aproximadamente 35 °C, para o mesmo período a temperatura ambiente é mantida dentro dos níveis de conforto.

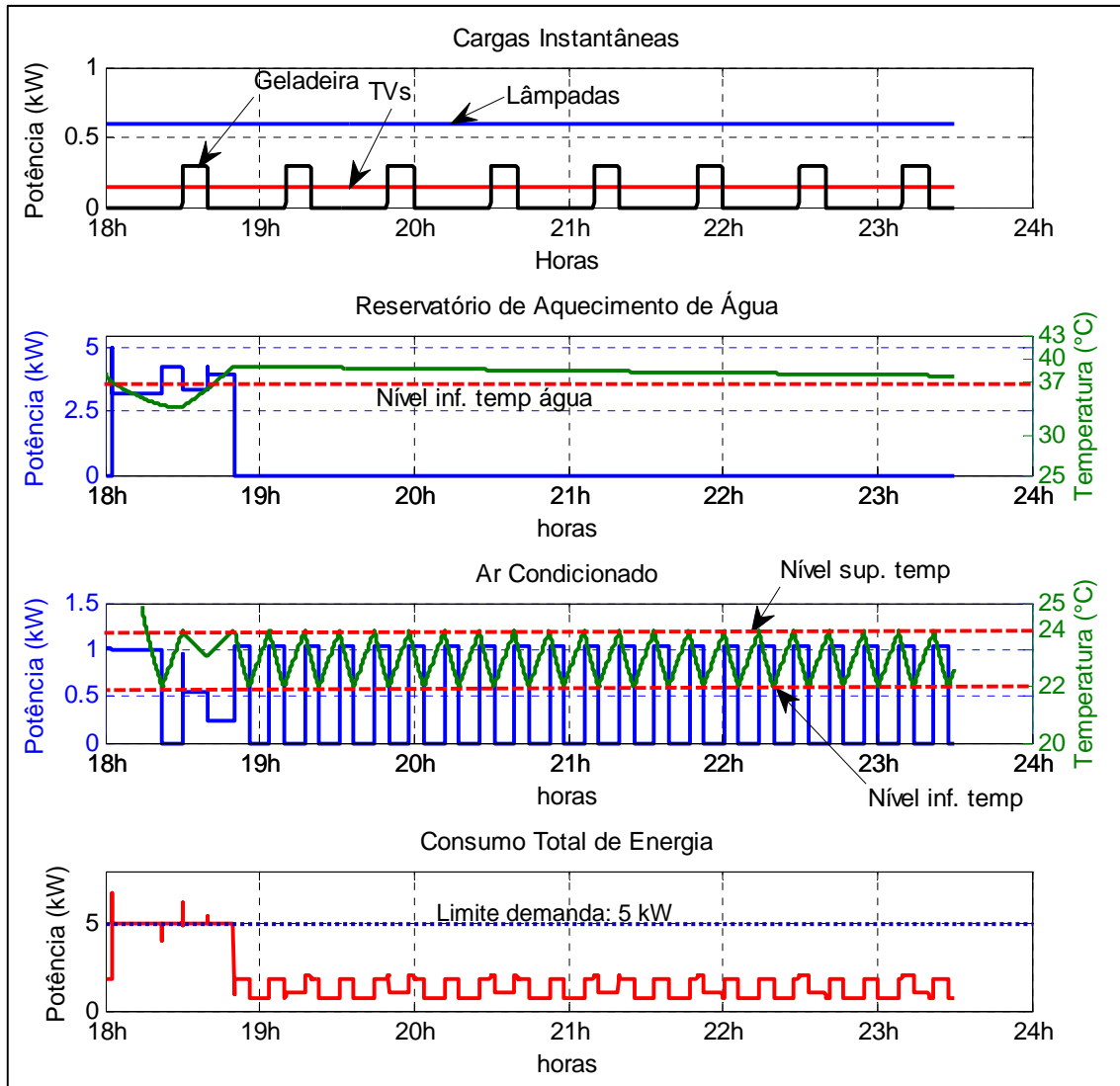


Figura 41 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganhos de carga iguais, a partir das 18h.
Fonte: Autoria Própria.

Na sequência foi realizada a simulação com o ganho de carga de 0,8 para o aquecimento de água e ganho de carga de 0,2 para o ar condicionado. Na Figura 42 é apresentado o resultado para as primeiras 7 horas de simulação.

Verifica-se que no início da simulação as duas cargas foram acionadas simultaneamente. Uma vez que o ganho parametrizado para o ar condicionado foi menor, sua potência incrementada foi mais baixa e apresentou o valor de 0,3 kW. Ainda, considerando que o aquecimento de água foi parametrizado com um ganho maior, este teve sua potência incrementada até o valor de 4,6 kW. Novamente verifica-se que o limite de demanda foi atendido, porém priorizando mais o aquecimento de água que o ar condicionado.

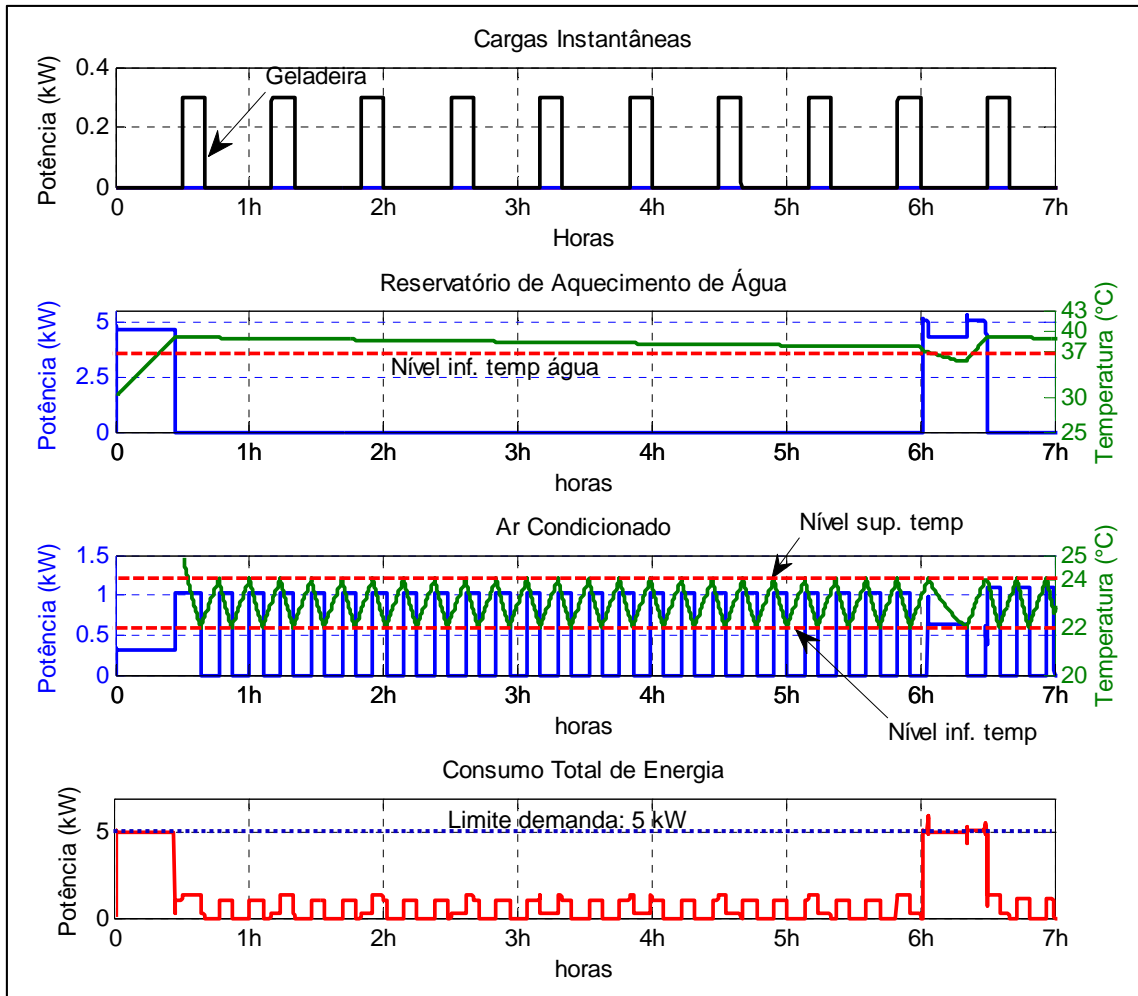


Figura 42 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o aquecimento de água, primeiras 7h de simulação.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 43 é apresentado o resultado a partir das 18 horas. Como o ganho de carga do ar foi configurado com um valor mais baixo, nos resultados é possível se observar a um período de violação no nível de conforto da temperatura ambiente em que a temperatura atinge um valor máximo de aproximadamente 26 °C.

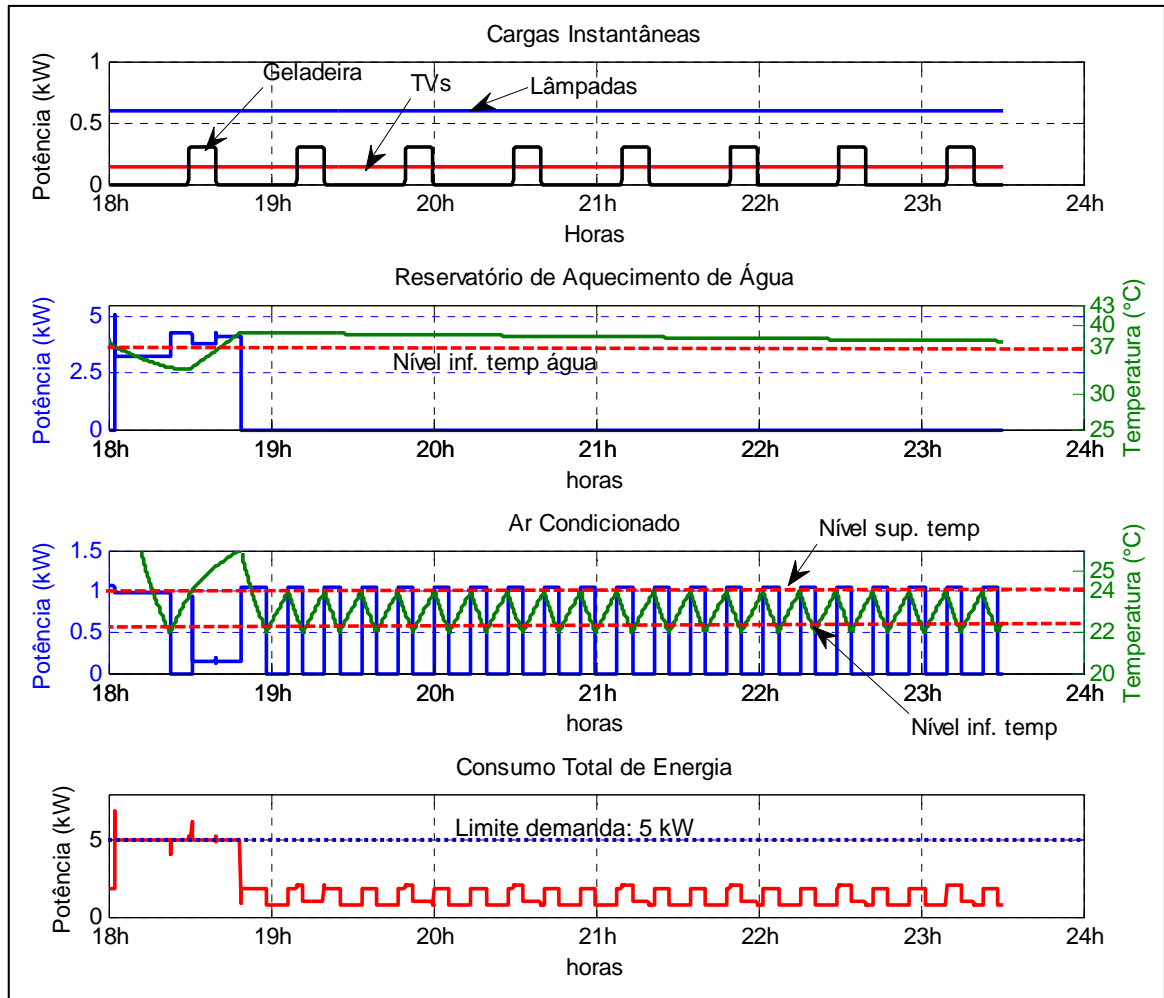


Figura 43 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o aquecimento de água, a partir das 18h. Fonte: Autoria Própria.

A terceira simulação foi realizada priorizando mais o ar condicionado que o aquecimento de água. O ganho de carga para o ar condicionado foi parametrizado em 0,8 enquanto o aquecimento de água teve o ganho de carga parametrizado em 0,2. O resultado da simulação para as primeiras 7 horas é apresentado na Figura 44.

No início da simulação as duas cargas são novamente ativadas simultaneamente e observa-se que o incremento máximo do aquecimento de água foi de 3,9 kW enquanto o incremento máximo do ar condicionado foi de 1 kW. Ao atingir o valor de temperatura ambiente desejado o ar condicionado é desativado o aquecimento de água é incrementado até o valor de 5kW. Na sequência ocorre novamente o acionamento do ar condicionado para realizar a manutenção da temperatura ambiente, neste segundo acionamento o ar condicionado é incrementado até o valor de 0,98 kW enquanto o aquecimento de água é incrementado até o valor de 3,8 kW. Nestes resultados observa-se que se priorizou o incremento do ar condicionado em relação ao incremento do aquecimento de água.

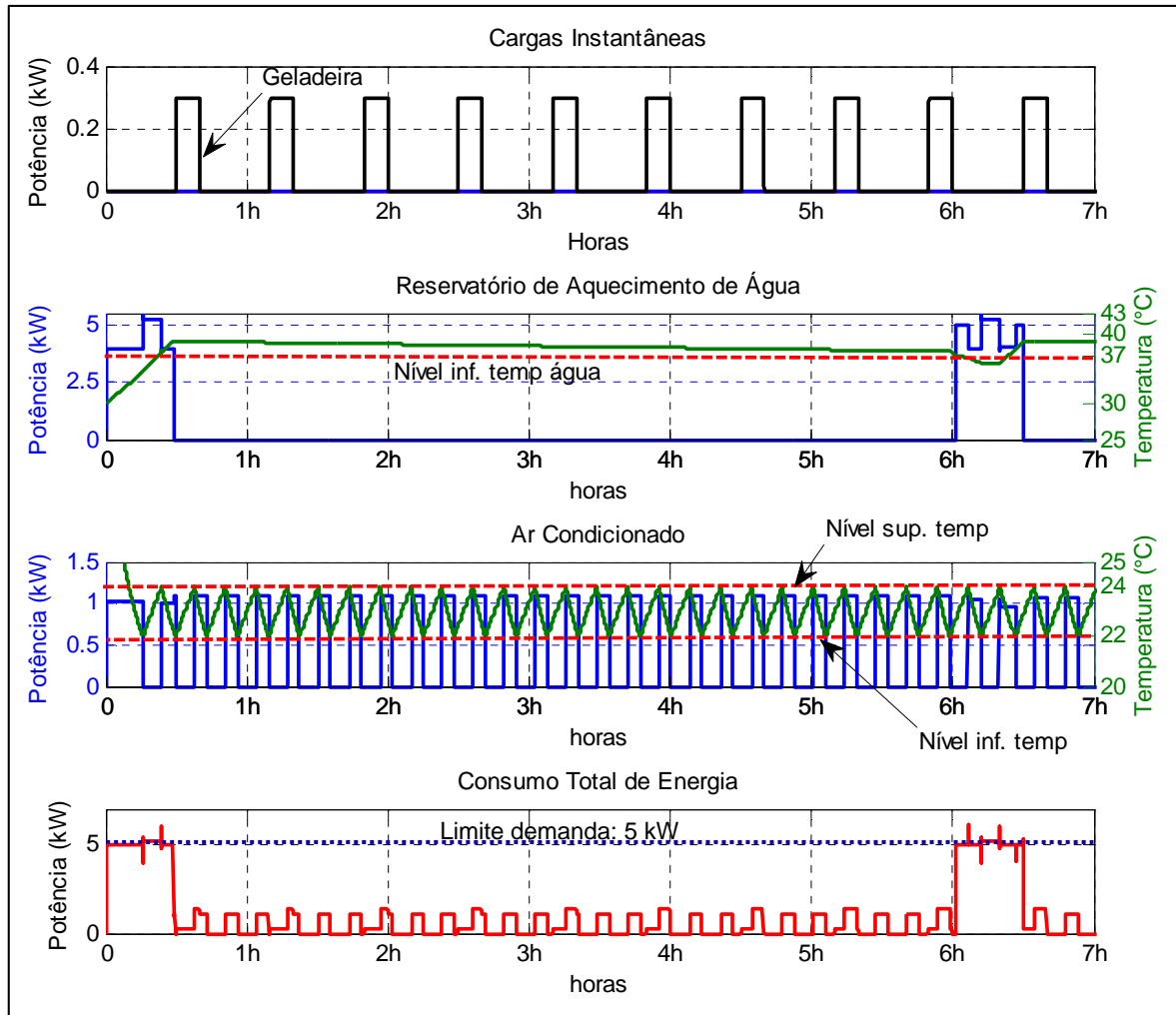


Figura 44 – Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o ar condicionado, primeiras 7h de simulação.

Fonte: Autoria Própria.

O resultado da simulação a partir das 18 horas é apresentado na Figura 45 em que se observa que a temperatura ambiente se manteve dentro dos níveis de conforto do usuário. Para a temperatura da água é apresentado um período de violação dos níveis de conforto em que a temperatura atinge o valor mínimo próximo de 35°C.

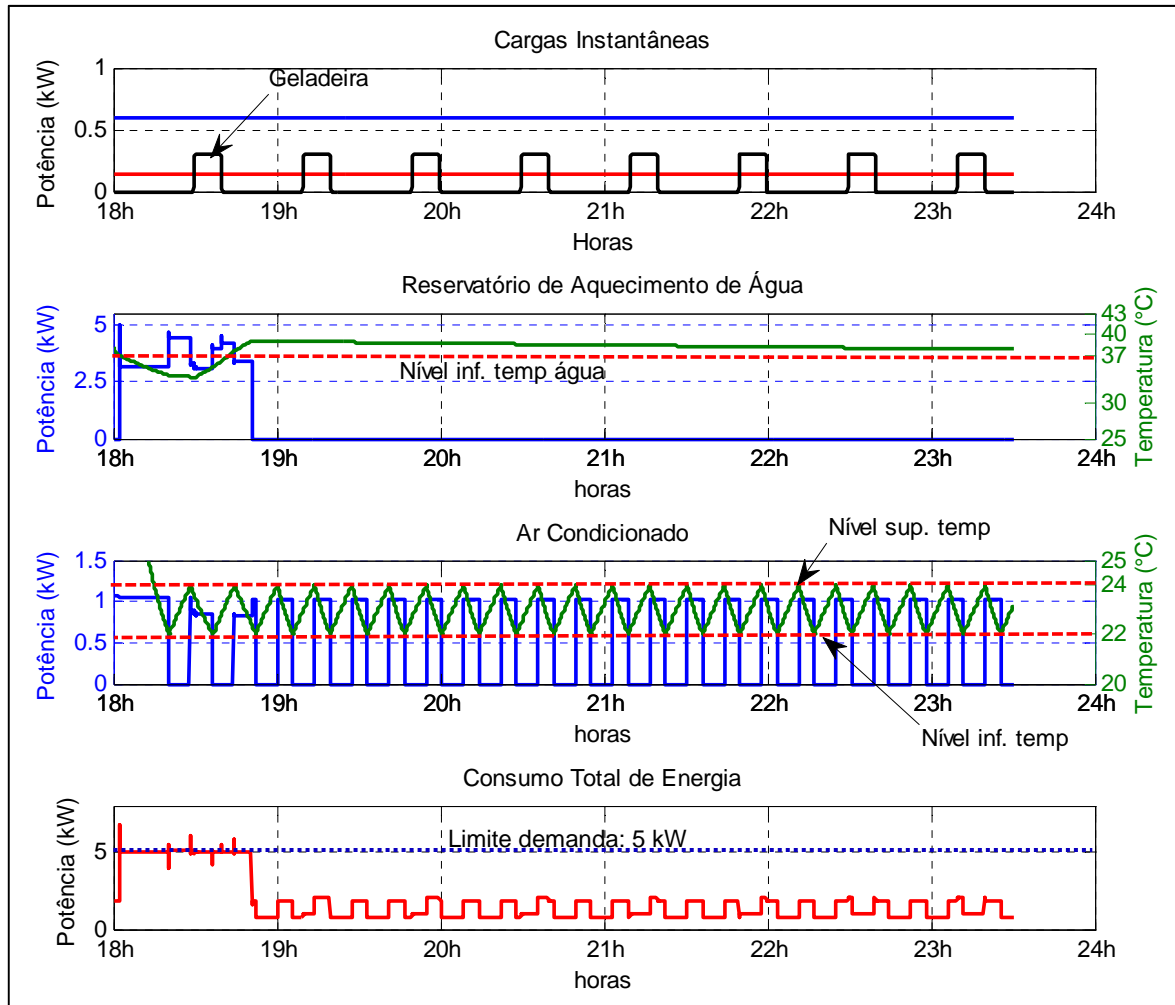


Figura 45 - Consumo total de energia e controle de acionamento das cargas, com limitador de demanda utilizando o CDAP com ganho de carga maior para o ar condicionado, a partir das 18h.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 46 é apresentada uma comparação entre os tempos necessários para a temperatura da água e a temperatura ambiente atingirem os valores desejados pelos usuários, para os ganhos de carga simulados anteriormente. Os tempos apresentados na Figura 46 são referentes ao primeiro acionamento junto das duas cargas que ocorreu no início da simulação. Para a simulação em que o ganho de carga do aquecimento de água foi de 0,2 e o ganho de carga do ar condicionado foi de 0,8, o tempo para que a temperatura ambiente chegasse ao valor desejado foi de 15 minutos, e o tempo para que a temperatura da água chegasse ao valor desejado foi de 29,3 minutos. Dessa forma observa-se que como foi priorizado o ar condicionado em relação ao aquecimento de água, o tempo de resfriamento do ambiente foi menor, quando comparado o tempo de resfriamento apresentado para os outros ganhos de carga parametrizados para o ar condicionado.

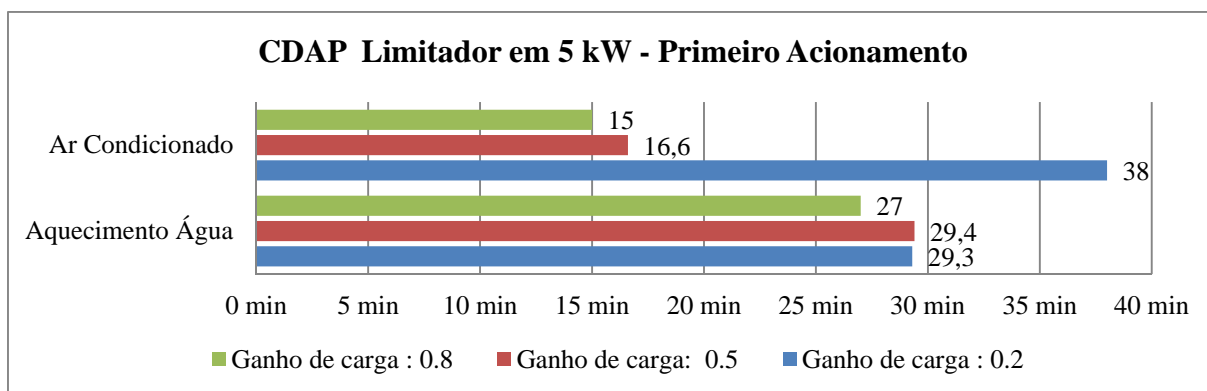


Figura 46 – Comparativo do tempo de acionamento do aquecimento de água e do ar condicionado para diferentes ganhos de carga.

Fonte: Autoria Própria.

Porém ao se configurar o ganho de carga em 0,8 para o aquecimento de água e 0,2 para o ar condicionado, o nível de conforto do usuário pode ser prejudicado. Observa-se que neste cenário o tempo para aquecimento de água foi de 27 minutos, e o tempo de resfriamento do ambiente foi de 38 minutos. Este tempo é muito longo quando comparado com os outros resultados e pode prejudicar o nível de conforto do usuário. O tempo longo de resfriamento do ambiente apresentado na simulação se deve ao fato do comportamento dinâmico da carga e de sua potência nominal. Neste caso o ar condicionado operou com 0,3 kW de potência e isso causou uma baixa potência de resfriamento.

Na Figura 47 é apresentado os valores de temperatura ambiente e da água para os diferentes ganhos de carga simulados a partir das 6 horas em que ocorreu o primeiro distúrbio no sistema. Verifica-se que para a temperatura ambiente os valores de ganho de carga apresentaram uma diferença acentuada nos valores de temperatura no período. O ganho de carga de 0,2 apresentou um tempo mais longo de resfriamento, e o ganho de carga de 0,8 um tempo de resfriado mais rápido. Para a temperatura da água a simulação com diferentes ganhos de carga não apresentaram diferenças significativas para o período conforme pode ser observado. Para os três ganhos de carga a temperatura da água diminuiu para o valor mínimo de aproximadamente 35°C.

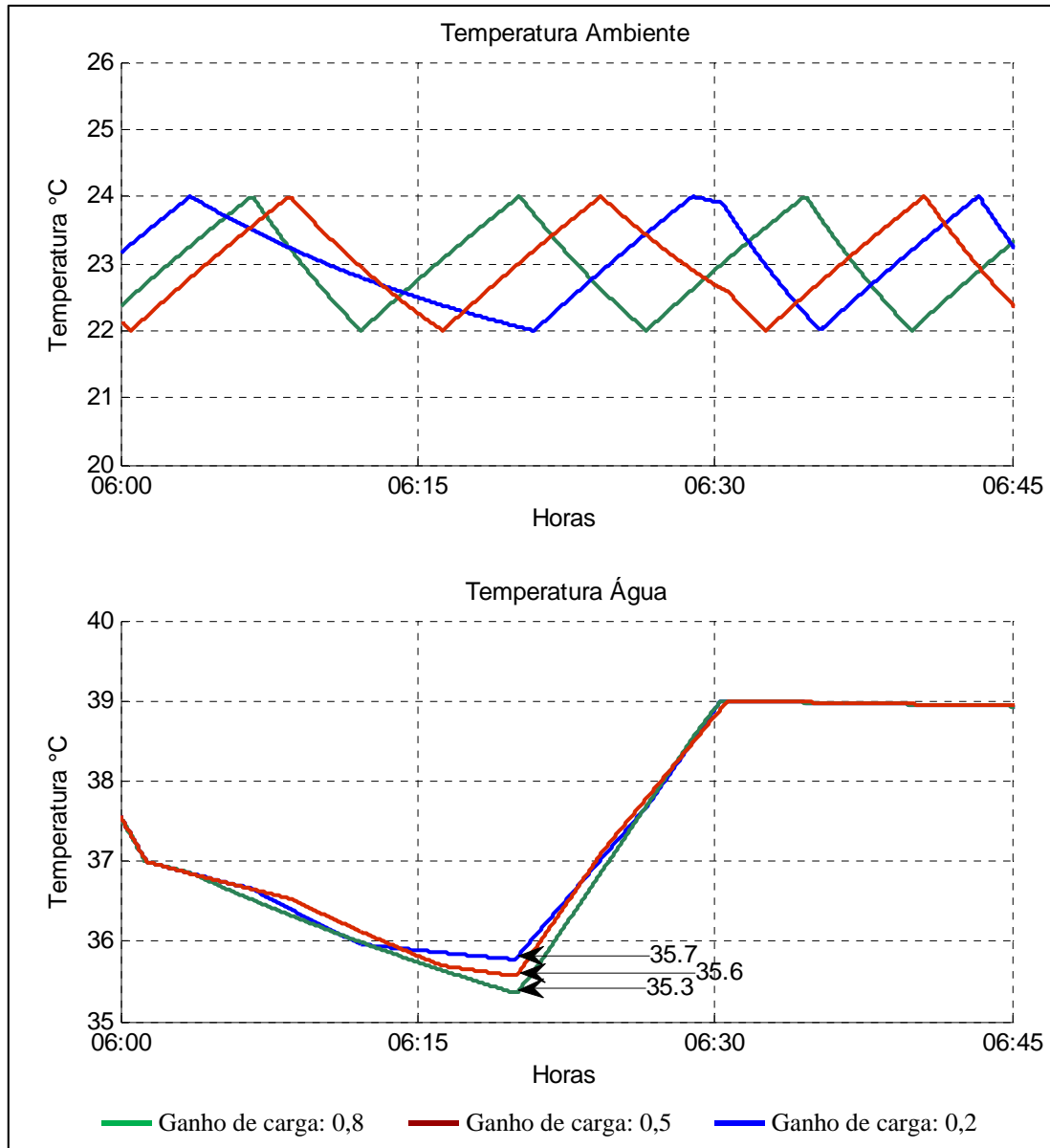


Figura 47 - Temperaturas com diferentes ganhos de carga no distúrbio a partir das 06h.
Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma verificou-se que devido a diferença de potência de cada carga e seu comportamento dinâmico, modificações de ganhos de carga apresentaram comportamentos diferentes para cada carga. No aquecimento de água, modificar o ganho de carga não apresentou valores com diferenças significativas nos tempos de aquecimento. Porém, no ar condicionado, a alteração do ganho de carga gerou grandes variações de tempo de resfriamento.

Na Figura 48 é apresentado o consumo de energia para as simulações do CDAP, se observa que o consumo foi muito próximo entre os cenários simulados, isso ocorre porque todas as cargas foram acionadas ao longo das simulações, porém o acionamento foi realizado

de forma gradual ao longo do tempo evitando picos de consumo que ultrapassem o limite de demanda parametrizado. Em razão dos limites superior e inferior de demanda utilizados no método de busca Rosenbrock, o CDAP nem sempre realiza o acionamento até a potência máxima da carga. O limite inferior de demanda é configurado como 1% menor que o limite superior, dessa forma quando a potência se encontra na faixa entre o limite inferior e superior, a busca mantém o valor de potência encontrada para a carga. Assim a potência mantida pode estar abaixo de seu limite máximo que é representado pelo limite superior de demanda. Em razão dessa característica foram apresentadas diferenças no consumo de energia do CDAP para diferentes limites de demanda.

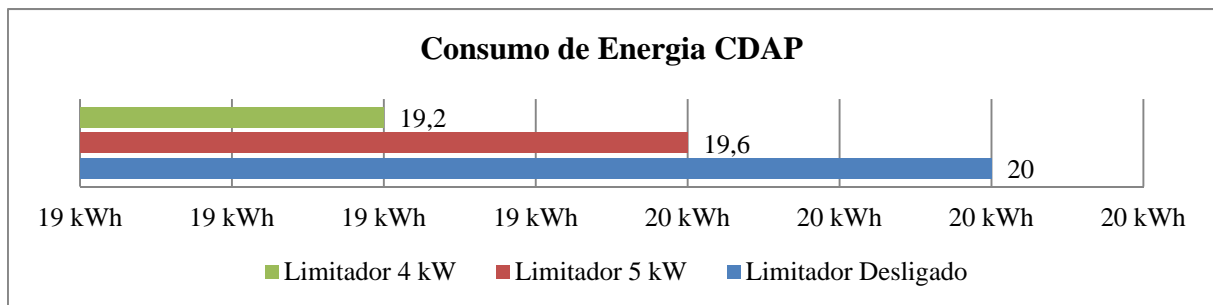


Figura 48 – Consumo de energia CDAP
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 49 é apresentado um comparativo entre os controladores com o tempo para o aquecimento de água durante o primeiro acionamento. Para o CDAP foi utilizado o ganho de carga de 0,5. Verifica-se que com o limite de demanda desativado para os três controladores foi preciso um tempo de 25 minutos para que a temperatura da água atingisse o valor desejado. Ao se ativar o limitador de demanda este tempo passa para 29 minutos para o CDA e o CDAP e para 50 minutos para o CDBP. Dessa forma observa-se que o CDBP leva 21 minutos a mais que o CDA e o CDAP para aquecer a água quando o limitador está ativo. Ou seja, para o primeiro acionamento CDA e o CDAP é 42% mais rápido no aquecimento de água em relação ao CDBP com o limitador de demanda ativo.

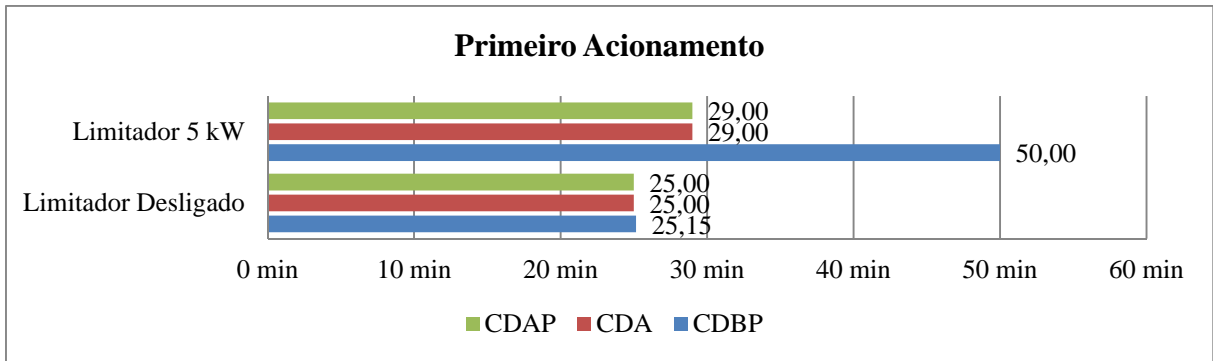


Figura 49 - Comparativo entre os controladores para o tempo de aquecimento de água no primeiro acionamento.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 50 é exibida a comparação entre os controladores para o tempo de aquecimento de água no segundo período em que o acionamento de aquecimento de água e ar condicionado ocorreram concorrentemente. Observa-se que o CDA e o CDAP levaram apenas 2 minutos a mais para aquecer a água quando o limitador está ativo, enquanto o CDBP leva 28 minutos. Dessa forma o CDA e o CDAP apresentam uma redução de 52% no tempo de aquecimento de água quando comparado ao CDBP com o limitador de demanda ativo.

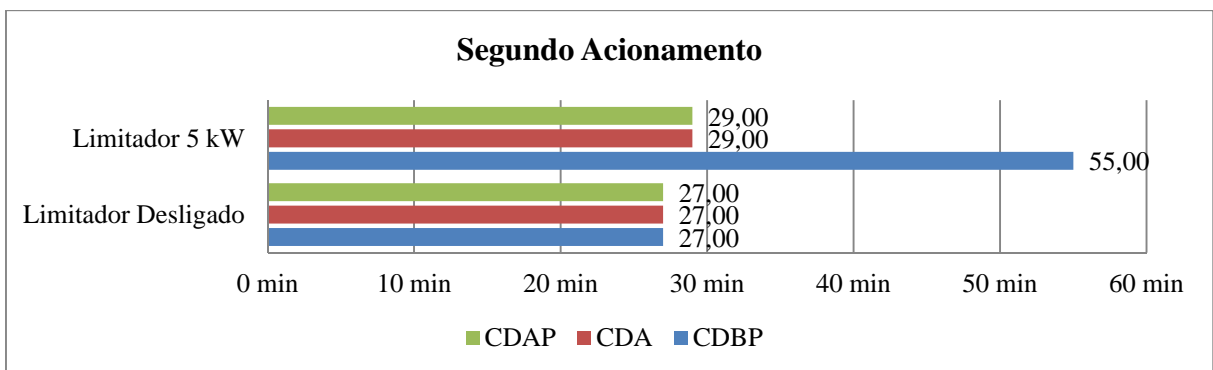


Figura 50 - Comparativo entre os controladores para o tempo de aquecimento de água no segundo acionamento.

Fonte: Autoria Própria.

4.7 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado um novo algoritmo de controle de demanda do tipo adaptativo que utilizou o método de busca Rosenbrock. Este algoritmo permitiu o acionamento ponderado de duas cargas em um mesmo período e ainda evitou a ultrapassagem do limite de demanda. Inicialmente foi apresentado um algoritmo chamado de CDA que realizou o acionamento ponderado de apenas uma carga. Verificou-se nos resultados da

simulação do CDA, que o tempo de aquecimento de água apresentou diferenças pouco significativas quando comparado os resultados com e sem o limitador de demanda ativo.

Na sequência foi apresentado o algoritmo que permitiu o acionamento ponderado de duas cargas em mesmo período evitando a ultrapassagem do limite de demanda. Este algoritmo chamado de CDAP possibilitou a parametrização de diferentes ganhos para os sinais de controle das cargas. Observou-se que dependendo do ganho parametrizado o nível de conforto do usuário pode ser otimizado ou prejudicado. No caso da resistência de aquecimento de água que possuiu uma potência mais elevada que o do ar condicionado, modificações no ganho de carga não apresentaram diferenças significativas no tempo de aquecimento de água. Porém para o ar condicionado a parametrização de um ganho de carga com baixo valor, apresentou níveis de desconforto para o usuário. O tempo para refrigeração do ambiente foi significativamente mais elevado com o limitador ativo, quando comparado com o tempo sem o limitador ativo.

5 EMULADOR HIL DE CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL

A implementação de um sistema para validação dos algoritmos analisados e propostos é de grande importância quando se considera a aplicabilidade de um conceito teórico. Assim, neste trabalho se propõe o uso de uma abordagem baseada em um sistema embarcado que executa os modelos de cargas em tempo real e apresenta os sinais de entrada e saída da planta em uma interface de *hardware*. Neste capítulo inicialmente apresenta-se o conceito HIL (*Hardware-In-The-Loop*). São então descritas as características da plataforma HIL bem como suas vantagens. Na sequência é apresentado o emulador de consumo de energia residência bem como a discretização do modelo de aquecimento de água e do modelo de temperatura ambiente.

5.1 PLATAFORMA HIL

A simulação baseada em *software* computacional possui a desvantagem de ser incapaz de reproduzir uma situação de real operação, visto que sinais elétricos de medição e controle não existem fisicamente. A simulação em uma arquitetura HIL é uma solução que permite a execução de modelos simulados em *software* em condições reais de operação. Na arquitetura HIL é utilizado um *hardware* que executa os modelos matemáticos que representam o comportamento dinâmico da planta a ser controlada (LU, WU, *et al.*, 2008).

A HIL apresentada três principais vantagens. A primeira delas é a utilização de um espaço reduzido para realizar os testes com a arquitetura, como não é utilizada uma planta real é possível em um pequeno laboratório realizar e analisar o comportamento do sistema. A segunda vantagem se refere a possibilidade de rápida modificação dos parâmetros da planta, é possível se modificar o tamanho de um tanque de armazenamento ou características de um barramento apenas realizando uma modificação de configuração nos modelos executados pelo *hardware* emulador. Dessa forma é possível emular diversos cenários diferentes para uma mesma planta de forma rápida e segura, pois com a utilização da HIL não é necessário realizar modificações físicas dos componentes da planta como ocorre em um protótipo real. A terceira vantagem se refere a segurança de operação, em algumas aplicações como instalações elétricas de alta potência a execução de ensaios pode ser de risco tanto para humanos quanto para equipamentos, utilizando a HIL estes riscos são minimizados e é possível se executar ensaios em condições muito semelhantes a operação real.

Porém, ao implementar uma arquitetura HIL, deve-se considerar que os valores emulados serão diretamente resultantes dos modelos implementados. Dessa forma o emulador fica restrito a quantidade e grau de complexidade das variáveis dos modelos implementados. Também se deve observar que por mais complexo que sejam os modelos implementados, a arquitetura HIL pode não apresentar um comportamento idêntico a uma planta real. Isso pode ocorrer em função de diversas características físicas de montagem que uma planta real pode apresentar, e que não está contemplada na arquitetura HIL. Como exemplo características de cabamentos, oscilações na alimentação de energia e ruído por fontes externas. Assim, dependendo da aplicação, a implementação HIL pode apresentar um comportamento insatisfatório. Neste trabalho a utilização de um emulador HIL foi possível devido às características dos modelos implementados, e atendeu aos requisitos desejados durante os ensaios experimentais.

Na Figura 51 é apresentado um exemplo de arquitetura HIL. Observa-se que na arquitetura proposta o controlador pode realizar a medição e controle através de sinais analógicos e/ou digitais provenientes do *hardware* que simula a planta, estes mesmos sinais podem ser medidos utilizando um osciloscópio ou outro aparelho de medição como um multímetro. Para o controlador a utilização de um *hardware* de simulação é transparente, ou seja, o controlador opera da mesma forma caso seja utilizado em uma planta real ou em uma arquitetura HIL. Assim, é possível analisar e validar o funcionamento do controlador.

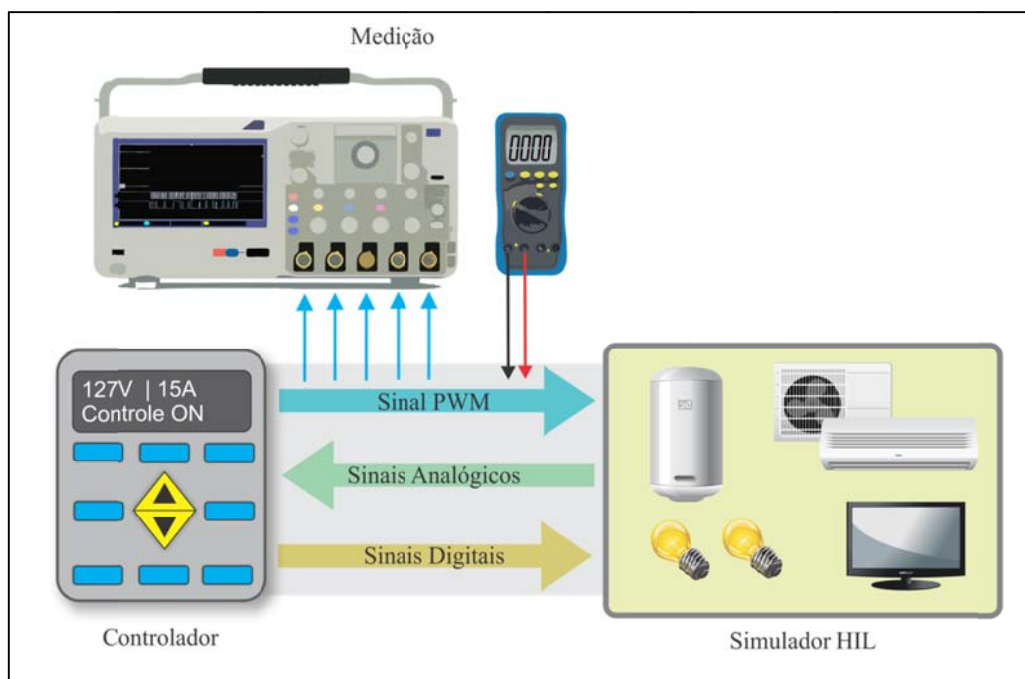


Figura 51 - Arquitetura HIL.
Fonte: Autoria Própria.

5.2 EMULADOR HIL DE CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL

O emulador de consumo residencial é constituído pelos modelos matemáticos do reservatório de aquecimento de água, temperatura ambiente e cargas instantâneas. Para a implementação no sistema embarcado é necessária inicialmente a conversão dos modelos em tempo contínuo para modelos em tempo discreto. Para a discretização, intervalos kT são definidos, onde $k = 1, 2, \dots, n$ e T é o período de discretização.

Na equação (28) é apresentado o modelo matemático do reservatório de aquecimento de água. Discretizando os elementos em função do tempo, utilizando o método de discretização *forward* de Euler, é encontrado o modelo de aquecimento de água em tempo discreto apresentado na equação (30)

$$\frac{dT_s(t)}{dt} = \frac{1}{r_o C_p V} \frac{P_f(t) - P_a(t)}{4,1868} + \frac{1}{V} \frac{Q(t)}{6.10^6} [T_e(t) - T_s(t)] \quad (28)$$

$$\frac{T_s(k+1) - T_s(k)}{T_{k+1} - T_k} = \frac{1}{r_o C_p V} \frac{P_f(k) - P_a(k)}{4,1868} + \frac{1}{V} \frac{Q(k)}{6.10^6} [T_e(k) - T_s(k)] \quad (29)$$

$$T_s(k) = T_s(k-1) + T \left[\frac{1}{r_o C_p V} \frac{P_f(k-1) - P_a(k-1)}{4,1868} + \frac{1}{V} \frac{Q(k-1)}{6.10^6} [T_e(k-1) - T_s(k-1)] \right] \quad (30)$$

O modelo matemático da temperatura ambiente em tempo contínuo é apresentado pela equação (31). Executando a discretização apresentado na equação (32), encontram-se os modelos discretizados de temperatura ambiente representado pela equação (33)

$$C \frac{dT_i}{dt} = \eta(T_0 - T_i) + \rho C_p q_s (T_{sa} - T_i) + L + Q \quad (31)$$

$$\frac{T_i(k-1) - T_i(k)}{T_{k+1} - T_k} = \frac{\eta}{C} (T_0(k) - T_i(k)) + \frac{\rho C_p q_s}{C} (T_{sa}(k) - T_i(k)) + \frac{L}{C} + \frac{Q}{C} \quad (32)$$

$$T_i(k) = T_i(k-1) + T \left[\frac{\eta}{C} (T_0(k-1) - T_i(k-1)) + \frac{\rho C_p q_s}{C} (T_{sa}(k-1) - T_i(k-1)) + \frac{L}{C} + \frac{Q}{C} \right] \quad (33)$$

Foi utilizada uma arquitetura do tipo HIL para a implementação do emulador de consumo residencial. A plataforma embarcada usada foi o sistema STM32F4DISCOVERY, composto por um microcontrolador de 32 bits ARM Cortex-M4 que possui as seguintes características:

- 168Mhz de frequência de operação;
- 1Mb de memória *flash*;
- Unidade de ponto flutuante;
- 3 ADC (Conversor analógico para digital) de 12 bits;
- 2 DAC (Conversor Digital para analógico) de 12 bits;
- Interface paralela para conexão com LCD;
- 140 portas de entrada e saída;
- 17 *timers*;
- 15 interfaces de comunicação.

Ainda, a plataforma STM32F4DISCOVERY possui para utilização em ensaios, quatro LEDs (azul, vermelho, laranja e verde), dois botões tipo *push button* (usuário e *reset*), duas entradas USB e acesso a todas as portas de entrada e saída do microcontrolador ARM Cortex-M4. Estas ferramentas podem ser utilizadas para visualização de eventos, como alarmes, acionamento de cargas, sinalização de níveis de demanda e interfaceamento com outros dispositivos.

Na Figura 52 é apresentado o fluxograma implementado no emulador utilizando os modelos discretizados.

Inicialmente o programa realiza a configuração dos periféricos: Conversor analógico para digital (ADC); Conversor digital para analógico (DAC) e portas de entrada e saída (IOs). Na sequência são realizadas a verificação para o pedido de acionamento da vazão para o reservatório de aquecimento de água e acionamento das cargas instantâneas (CI). O acionamento da vazão e das cargas instantâneas é realizado através de dois *push buttons*. Ao serem acionadas as CI, são ativados de forma simultânea os televisores e iluminação da residência. Após a verificação de acionamento da vazão e CI são executados os modelos discretizados de aquecimento de água, temperatura ambiente bem como os modelos de CI e o cálculo do consumo total da residência.

O primeiro modelo a ser executado é o de aquecimento de água, inicialmente é calculado o valor da potência do resistor de aquecimento (Pf), o cálculo é realizado utilizando

o sinal de controle do ADC1_ch0 e o valor da potência nominal do resistor de aquecimento da água (P_{fn}). Considerando que o ADC1_ch0 é um conversor de 12 bits é possível dessa forma se obter até 4096 valores de conversão.

Na equação (34) é apresentado o cálculo para a potência de aquecimento da água utilizando o valor do ADC1_ch0.

$$P_f = P_{fn} \times \frac{ADC1_ch0}{4095} \quad (34)$$

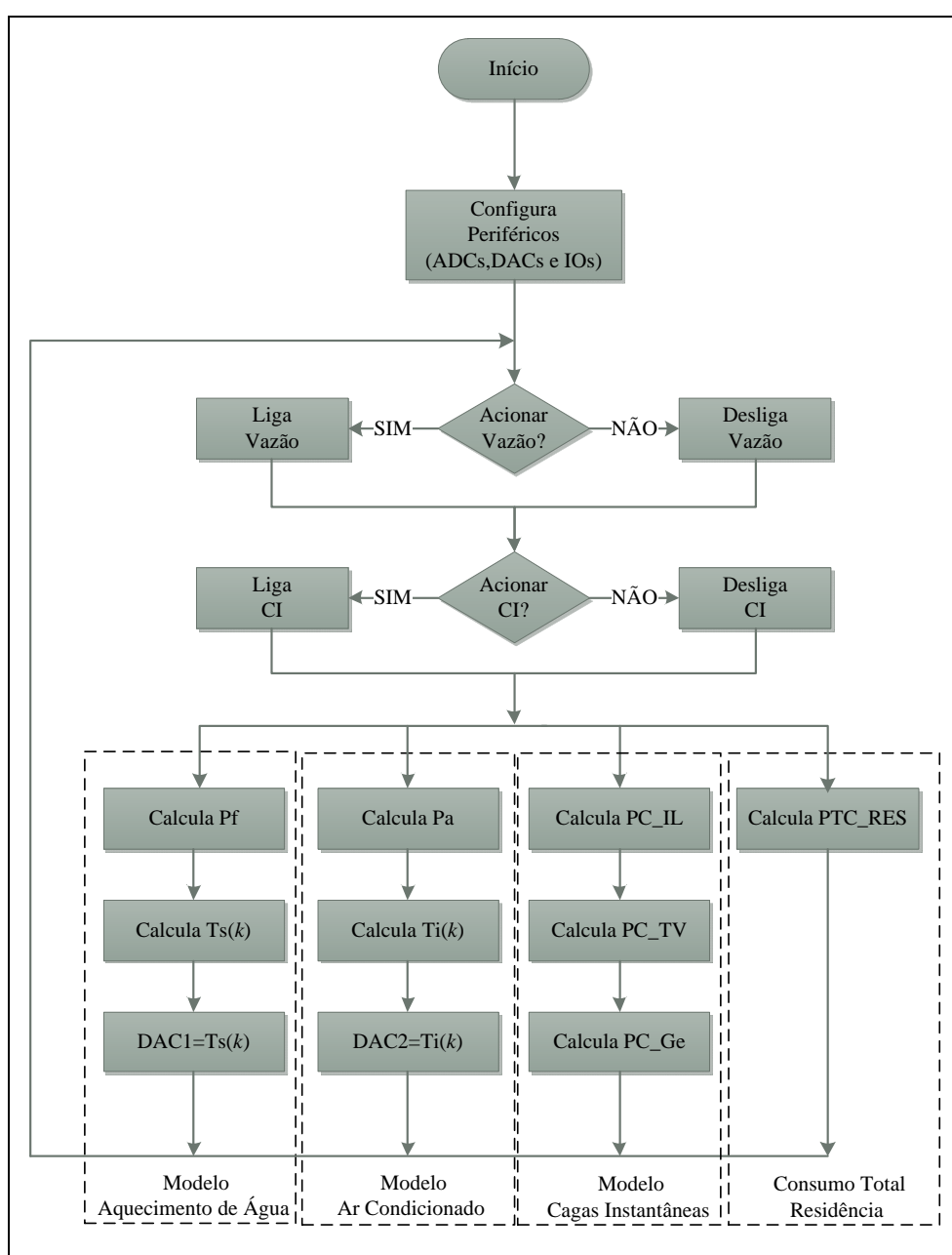


Figura 52 - Fluxograma emulador de consumo residencial.
Fonte: Autoria Própria.

Na sequência é calculado o valor da temperatura no interior do tanque ($T_s(k)$) no instante k , este cálculo é realizado utilizando a equação (30). Posteriormente o valor encontrado de $T_s(k)$ é convertido pelo DAC1 de 12 bits. Foi considerada uma faixa máxima de temperatura de 100 °C. Na equação (35) é apresentado o cálculo para se encontrar o valor convertido para o DAC1.

$$DAC_1 = \frac{T_s(k) \times 4095}{100} \quad (35)$$

O segundo modelo a ser executado é de temperatura ambiente. Inicialmente é calculado o valor da potência do aparelho de ar condicionado ($P_a(k)$) no instante k utilizando o sinal de controle do ADC1_ch1 e a potência nominal do ar condicionado (P_{an}) conforme apresentado na equação (36). Posteriormente é calculado o valor de temperatura interna do ambiente ($T_i(k)$) utilizando a equação (33). O valor de $T_i(k)$ é convertido pelo DAC2 conforme apresentado na equação (37), foi considerada uma faixa de operação de temperatura interna com o valor máximo de 45 °C.

$$P_a = P_{an} \times \frac{ADC1_ch1}{4095} \quad (36)$$

$$DAC_2 = \frac{T_i(k) \times 4095}{45} \quad (37)$$

O terceiro modelo a ser executado é o de CI. Este modelo é composto pelos cálculos do consumo de energia de televisores, iluminação e geladeira apresentados anteriormente. Após serem executados os modelos das cargas o emulador calcula a potência total consumida pela residência.

5.3 SUMÁRIO DO CAPITULO

Neste capítulo foi apresentada as características de uma plataforma HIL, bem como a implementação do modelo de consumo de energia residencial composto pela discretização dos modelos de aquecimento de água e temperatura ambiente. Uma das principais vantagens apresentadas ao se implementar o modelo de consumo de energia residencial em uma

plataforma HIL é a agilidade na modificação de parâmetros para simulação e obtenção de valores emulados de uma planta. Enquanto em um protótipo real é necessário se reconstruir ou trocar fisicamente seus componentes para realizar a modificação de parâmetros, na arquitetura HIL basta modificar um valor na variável do modelo desejado. Outra vantagem da HIL é o tamanho reduzido da plataforma que é composta apenas por uma placa eletrônica microprocessada.

6 PLATAFORMA DE ENSAIOS E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados a plataforma utilizada para a realização de ensaios e os resultados experimentais do emulador de consumo residencial e dos controladores de demanda apresentados anteriormente.

Inicialmente é descrita a plataforma de ensaio utilizada, constituída de uma arquitetura HIL, posteriormente é apresentada a interface gráfica utilizada para verificação e parametrização do controlador de demanda. Na sequência são descritos os resultados experimentais apenas do emulador de consumo de energia residencial implementado em uma plataforma HIL. Posteriormente apresentam-se os resultados experimentais dos algoritmos de controle de demanda simulados anteriormente.

6.1 PLATAFORMA DE ENSAIOS

O controlador de demanda foi implementado em uma plataforma STM32F4DISCOVERY e conectado ao emulador HIL de consumo de energia elétrica residencial para obtenção dos resultados experimentais do controlador. Na Figura 53 é apresentada de forma mais detalhada a implementação da arquitetura utilizada nos ensaios.

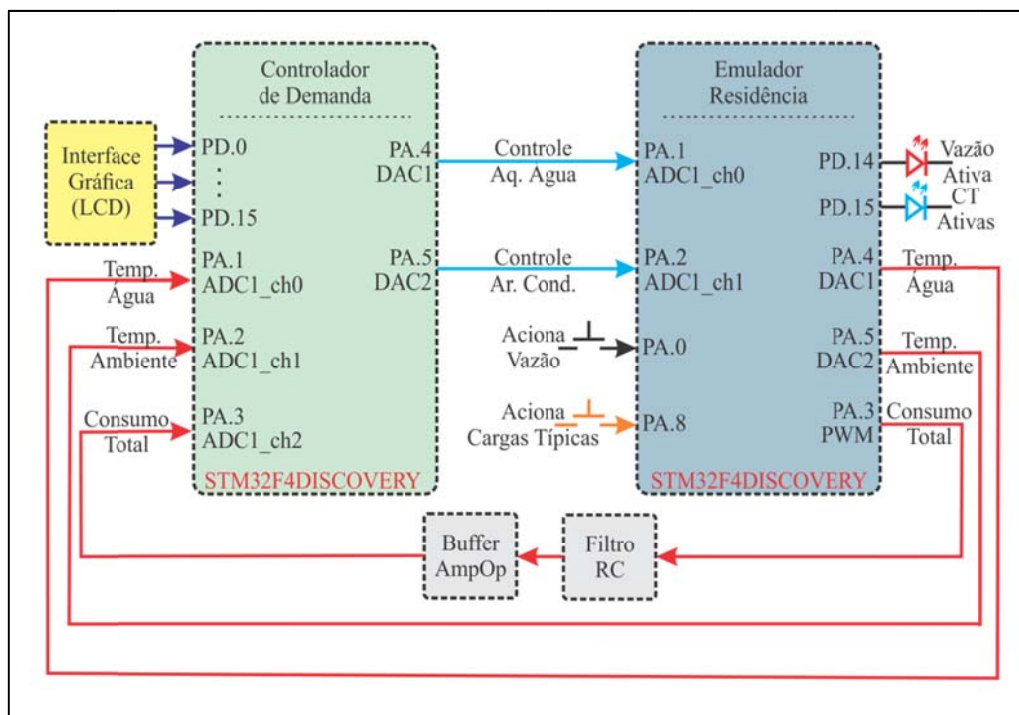


Figura 53 - Plataforma de ensaios, arquitetura HIL.
Fonte: Autoria Própria.

A plataforma em que foi implementado o controlador de demanda possui as seguintes entradas e saídas:

Entradas:

- Temp. Água: É conectado no ADC1 canal 0 na porta PA.1 o sinal referente a temperatura da água no tanque de aquecimento.
- Temp. Ambiente: No ADC1 canal 1 na porta PA.2 é conectado o sinal da temperatura ambiente de uma sala climatizada.
- Consumo Total: Nesta porta é conectado o sinal referente ao consumo total de energia da residência

Saídas:

- Controle Aq. Água: O DAC da porta PA.4 possui o sinal de controle da potência de aquecimento do reservatório de aquecimento de água.
- Controle Ar Cond.: Sinal de controle do ar condicionado.

O emulador de consumo residencial é constituído das seguintes entradas e saídas:

Entradas:

- a) Controle Aq. Água: Recebe o sinal de controle do aquecimento de água proveniente do controlador de demanda.
- b) Controle Ar Cond.: Recebe o sinal de controle do ar condicionado proveniente do controlador de demanda.
- c) Aciona Vazão: Nesta entrada é conectado o *push botton* de usuário da STM32F4DISCOVERY para realizar o acionamento da vazão no modelo de aquecimento de água.
- d) Aciona Cargas Instantâneas (CI): Foi utilizado um *push botton* externo ao sistema STM32F4DISCOVERY para realizar o acionamento das cargas instantâneas do emulador.

Saídas:

- a) Temp. Água: É utilizado o DAC1 da porta PA.4 para gerar o sinal de saída referente a temperatura da água no interior do tanque de aquecimento.
- b) Temp. Ambiente: Nesta saída é gerado o sinal referente a temperatura ambiente do modelo do ambiente climatizado por um ar condicionado.
- c) Consumo Total: Foi utilizada uma saída do tipo PWM através do *Timer2* canal 4 na porta PA.3 para fornecer o sinal referente ao consumo total de energia da residência.
- d) Vazão Ativa: Se utilizou o LED vermelho da STM32F4DISCOVERY para indicar quando a vazão do reservatório de aquecimento de água esta ativo.
- e) Cargas Instantâneas (CI) Ativas: O LED Azul da STM32F4DISCOVERY foi utilizado para indicar quando as cargas instantâneas estão ativas.

Na Figura 54 é apresentado um diagrama das ligações realizadas entre as plataformas embarcadas que executam o algoritmo de controle de demanda e o emulador de consumo de energia elétrica residencial. É possível observar na Figura 54 os sinais de controle provenientes do controlador de demanda, bem como os sinais para medição dos valores de temperatura e consumo de energia do emulador da residência. Ainda é possível se observar os LEDs que indicam o acionamento da vazão e CI. Para o acionamento das CI foi utilizado um *push botton* externo e para o acionamento da vazão foi utilizado um *push botton* disponível na plataforma.

Foi utilizado um sinal do tipo PWM na saída de consumo total do emulador devido a falta de mais um DAC, pois o microcontrolador utilizado possui apenas dois DAC. Devido a

utilização do PWM, o sinal gerado precisou ser condicionado através de um filtro RC e um *buffer* antes de ser enviado para o controlador. Inicialmente o filtro fornece em sua saída a tensão média do sinal PWM e na sequência um *buffer* é utilizado em razão do nível de impedância de entrada do ADC do controlador, que realiza a leitura incorreta do sinal sem a utilização do *buffer* após o filtro.

Os modelos do emulador e os algoritmos de controle de demanda foram implementados utilizando-se a linguagem C, onde a compilação e a gravação do *firmware* foi realizada através do *software* CoCoX CoIDE.

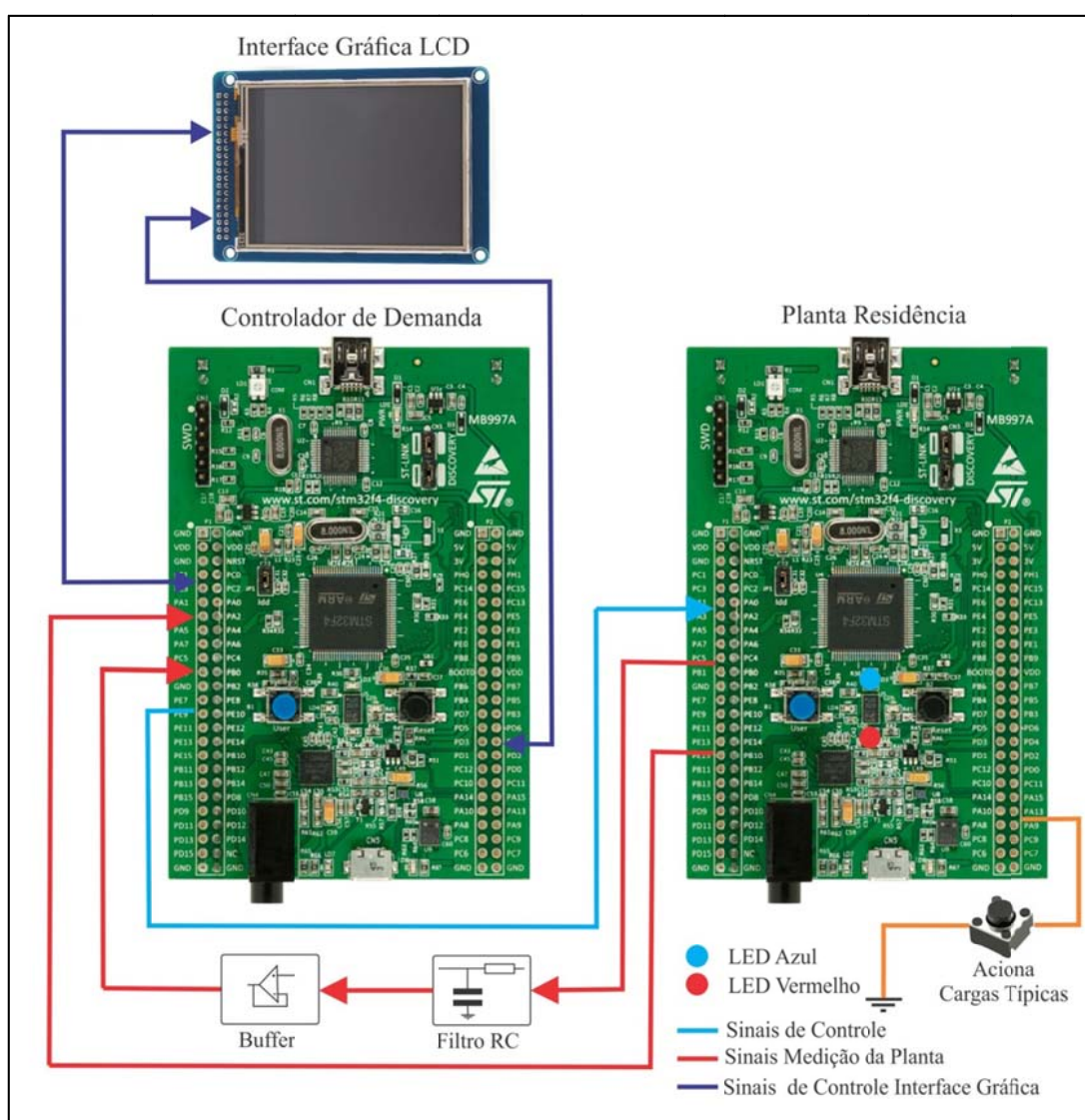


Figura 54 - Diagrama físico plataforma de ensaio.
Fonte: Autoria Própria.

6.2 INTERFACE GRÁFICA

Foi utilizada uma interface gráfica para possibilitar a visualização dos valores de temperatura e demanda de energia bem como a parametrização do controlador de demanda.

A interface gráfica foi constituída de um de *display* cristal líquido *touch screen* de 320x240 *pixels*. Na Figura 55 é apresentada a tela de controle exibida na interface gráfica, é possível visualizar as informações divididas em três quadros: Controle aquecimento água, controle temperatura ambiente e controle de demanda. Os quadros controle aquecimento água e temperatura ambiente exibem as informações de *setpoint* que indicam as temperaturas desejadas pelo usuário, também são exibidos valores atuais de temperatura da água e ambiente, e ainda são exibidos os sinais de controle das cargas, que podem assumir valores que variam de 0 a 1. O terceiro quadro exibe as informações referentes ao controle de demanda, no item *setpoint* pode-se visualizar o valor de limite de demanda parametrizado pelo usuário e no item consumo total é exibido o valor de consumo total de energia da residência em kW. Na tela de controle também é exibido graficamente o valor de consumo total da residência através de uma barra com uma escala em kW.

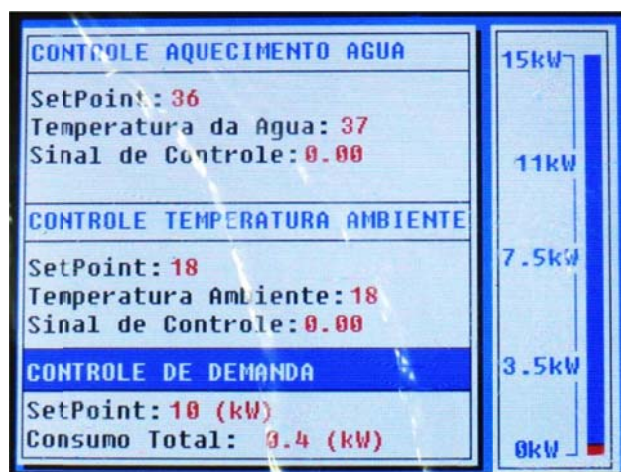


Figura 55 - Interface gráfica parâmetros de controle.
Fonte: Autoria Própria.

Através da interface gráfica é possível realizar a parametrização dos limites de temperatura da água, temperatura ambiente e limite de demanda de energia. Para isso foi utilizada a funcionalidade *touch screen* do *display*. Ao realizar o toque na tela onde é exibida a palavra *setpoint* uma nova janela do tipo *popup* é exibida conforme apresentado na Figura 56, nessa janela é possível realizar o incremento ou decremento do *setpoint* selecionado.

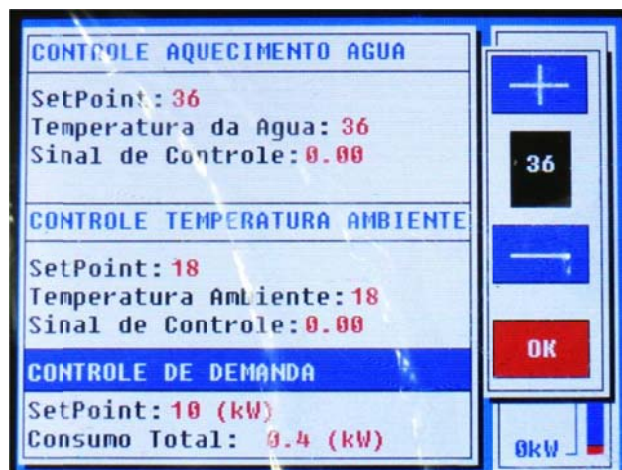


Figura 56 - Interface gráfica parametrização de *setpoints*.
Fonte: Autoria Própria.

6.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO EMULADOR DE CONSUMO RESIDENCIAL

Os resultados experimentais dos modelos discretizados implementados no emulador, foram coletados de duas formas, primeiramente através da comunicação serial entre o emulador e o *Matlab* e depois através da medição das saídas do emulador utilizando um osciloscópio.

Os dados recebidos através da comunicação serial foram comparados com os resultados da simulação para validar a implementação do modelo no emulador. Utilizando o osciloscópio foi possível analisar as saídas físicas no emulador dos modelos.

Inicialmente foi executado no emulador o modelo de temperatura ambiente, os parâmetros utilizados no ensaio foram os mesmos utilizados nas simulações apresentadas anteriormente no capítulo de modelagem e simulação de cargas residenciais. Os valores obtidos pela comunicação serial comparados com os valores simulados são apresentados na Figura 57. É possível observar que os resultados simulados e experimentais estão sobrepostos indicando que o modelo executado no emulador possui o mesmo comportamento que o modelo simulado.

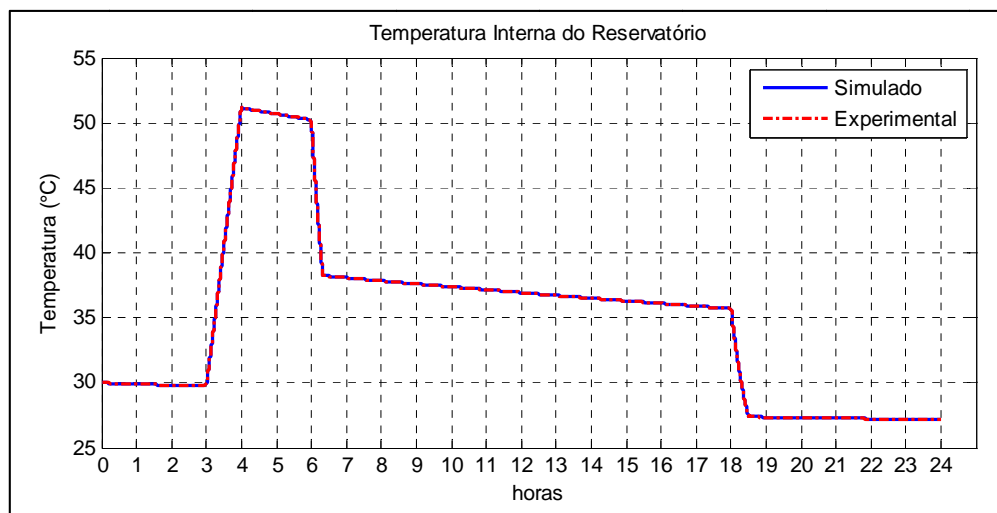


Figura 57 - Comparação entre resultados simulados e experimentais do modelo de aquecimento de água.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 58 é apresentado o resultado obtido pelo osciloscópio a partir da execução do modelo de temperatura ambiente.

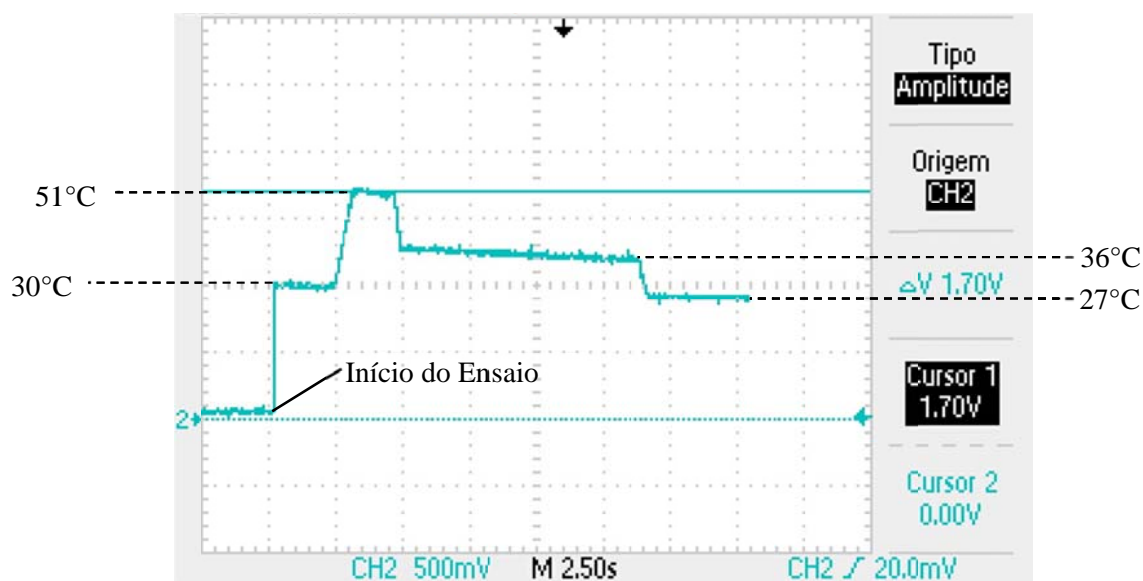


Figura 58 - Resultado do osciloscópio para o modelo de aquecimento de água.

Fonte: Autoria Própria.

O ensaio é inicializado a partir de 2,5 segundos. Considerando que a saída do ADC1 pode assumir o valor máximo de 3,3V e que a saída de temperatura do tanque pode assumir o valor máximo de 100°C tem-se a seguinte relação apresentada pela equação (38):

$$T_s = \frac{S_{ADC1} \times 100}{3,3} \quad (38)$$

Utilizando a escala vertical do osciloscópio configurada em 500mV é possível verificar que a tensão mais alta medida foi de 1,7V. Aplicando a relação descrita na equação (38) verifica-se que 1,7V representa aproximadamente 51°C, que é um valor muito próximo ao valor observado a partir das 4 horas na simulação.

Na sequência foram realizados os ensaios do modelo de temperatura ambiente, na Figura 59 é apresentado os valores obtidos pela comunicação serial comparados com os valores simulados. Novamente observa-se que os valores simulados e experimentais se sobrepõem, indicando que o modelo implementado experimentalmente possuiu um comportamento dinâmico semelhante ao modelo simulado.

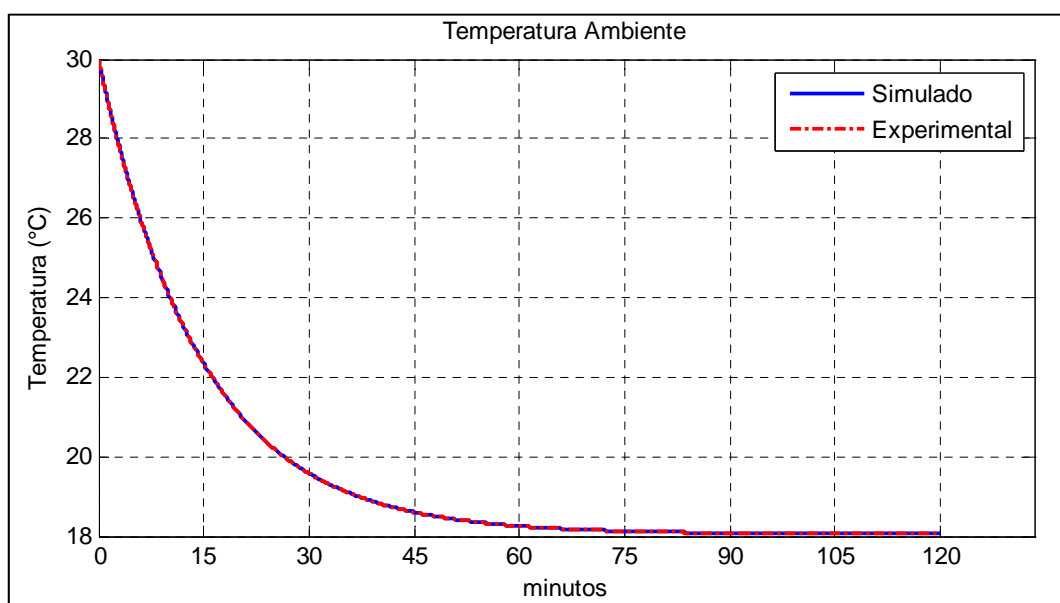


Figura 59 - Comparação entre resultados simulados e experimentais do modelo de temperatura ambiente.
Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente foram medidos os valores de saída do modelo de temperatura ambiente a partir do DAC2. Os resultados obtidos utilizando o osciloscópio são apresentados na Figura 60. Considerando 45°C como valor máximo de saída, tem-se a relação apresentada pela equação (39) para se determinar o valor de temperatura ambiente medida a partir do ADC2.

$$T_i = \frac{S_{ADC2} \times 45}{3,3} \quad (39)$$

Analisando a Figura 60 se verifica que o ensaio inicializa a partir de 500ms com o valor máximo medido de 2,2V, utilizando a equação (39) encontra-se que 2,2V representa aproximadamente 30°C. Comparando os valores medidos no osciloscópio com os valores simulados se observa que o modelo implementado experimentalmente na plataforma embarcada apresenta o mesmo comportamento que o modelo simulado no *Matlab*.



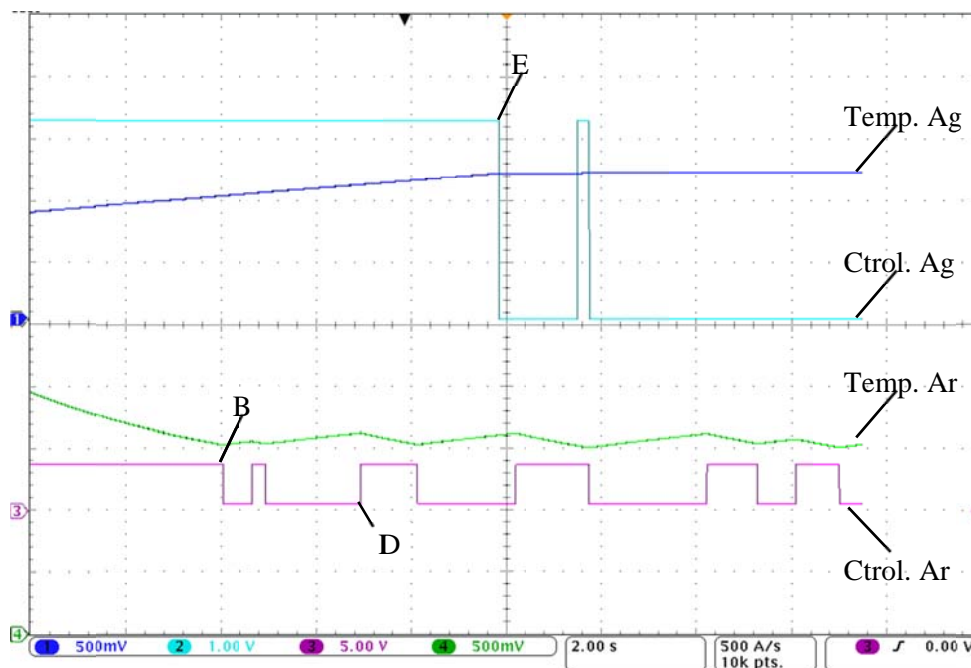
Figura 60 - Resultado do osciloscópio para o modelo de temperatura ambiente.

Fonte: Autorial Própria.

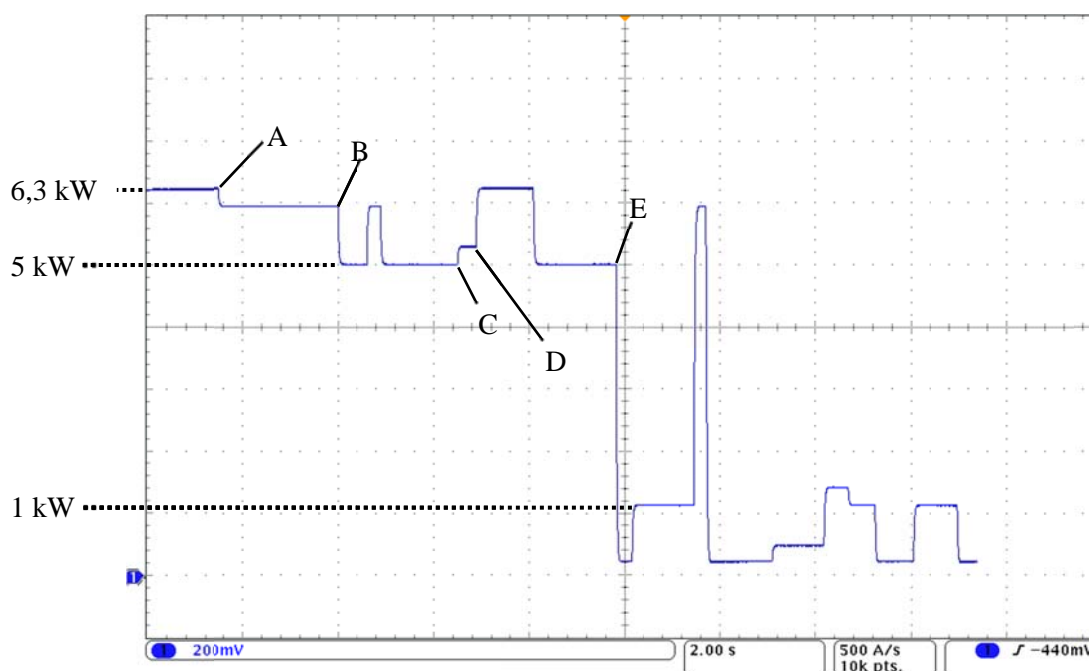
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CDA

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios do CDA atuando no emulador de consumo residencial. Para realizar as medições foram utilizados dois osciloscópios com quatro entradas, no primeiro osciloscópio foram realizadas as medições dos seguintes sinais: temperatura da água, sinal de controle de aquecimento da água, temperatura ambiente e sinal de controle do ar condicionado. No segundo osciloscópio foi realizada a medição da potência total consumida pela residência.

Inicialmente o ensaio foi realizado com o controlador de demanda parametrizado sem a atuação do limitador de demanda, na Figura 61a são apresentados os sinais referentes as cargas e na Figura 61b é apresentado o consumo total da residência.



(a)



(b)

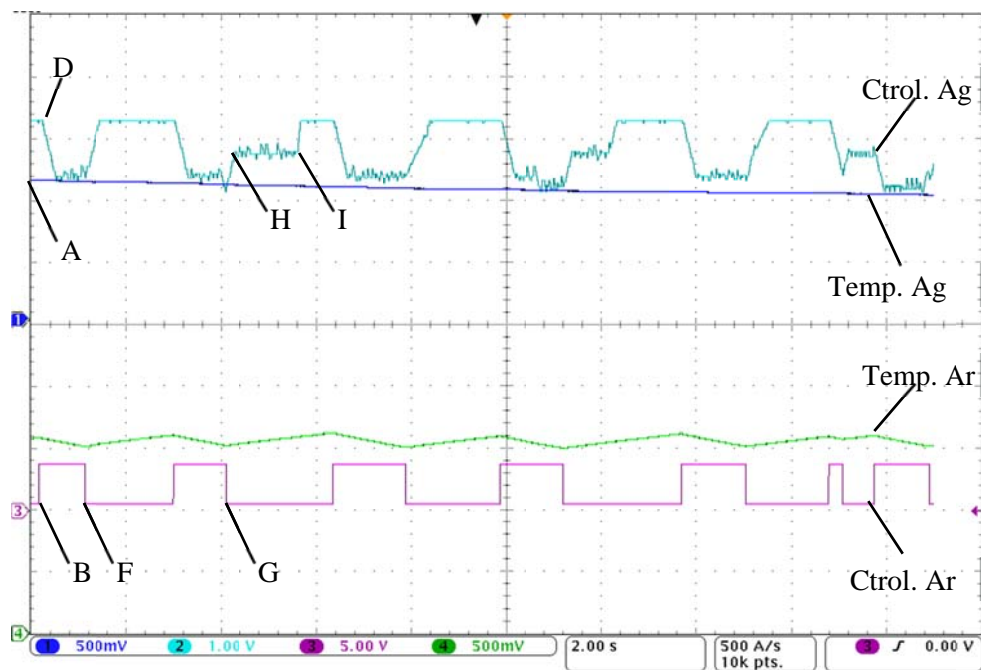
**Figura 61 - Resultados experimentais do CDA sem limitador de demanda. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.
Fonte: Autoria Própria.**

No início do ensaio o aquecimento de água, o ar condicionado e a geladeira estão acionados, resultado em uma demanda total da residência de 6,3kW representado na Figura 61b. A partir do instante “A” da Figura 61b a geladeira é desligada e a demanda total da

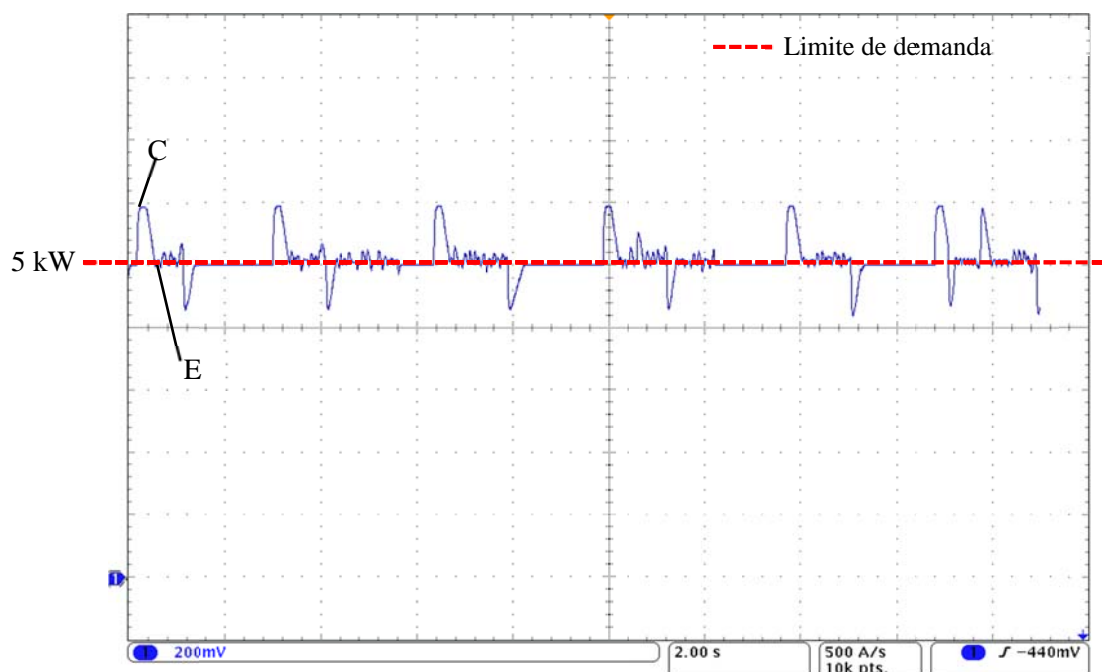
residência passa a ser de 6 kW. No instante “B” a temperatura ambiente atinge o valor desejado de 24 °C e o ar condicionado é desligado, sendo que a demanda da residência passa a ser de 5 kW. No instante “C” é novamente ativada a geladeira, e no instante “D” é novamente ativado o ar condicionado. A partir do momento “E” é desativado o aquecimento de água, pois a temperatura da água atingiu o valor desejado de 38 °C.

Na sequência o ensaio foi realizado com o controlador de demanda parametrizado com o limite de 5 kW. Na Figura 62a são apresentados os sinais referentes as cargas e na Figura 62b é apresentado o consumo total da residência.

A partir do instante “A” é ativada a vazão no reservatório de aquecimento de água, dessa forma o controlador ativa a resistência de aquecimento para elevar a temperatura da água. A vazão fica ativada durante todo o ensaio. No instante “B” na Figura 62a é acionado o ar condicionado e isto causa a ultrapassagem do limite de demanda de 5 kW conforme indicado por “C” na Figura 62b. Imediatamente o controlador começa a decrementar o sinal de controle de aquecimento de água, conforme indicado em “D”, até que a demanda de energia total da residência fique abaixo do limite, conforme indicado em “E”. Posteriormente no instante “F” o ar condicionado é desligado e ficam liberados 1 kW para uso, a partir desse momento o sinal de controle do aquecimento de água é incrementado utilizando a potência de 1 kW que foi disponibilizada com a desativação do ar condicionado. No momento “G” em que o ar condicionado é desativado novamente ocorre o incremento do aquecimento de água. Porém neste momento a potência de aquecimento não utiliza totalmente os 1 kW disponibilizados com a desativação do ar condicionado, pois nesse período a geladeira está ativada. Dessa forma o aquecimento de água é incrementado até o valor máximo indicado por “H”, posteriormente com o a desativação da geladeira ocorre novamente o incremento do aquecimento de água, conforme indiciado em “I”.



(a)

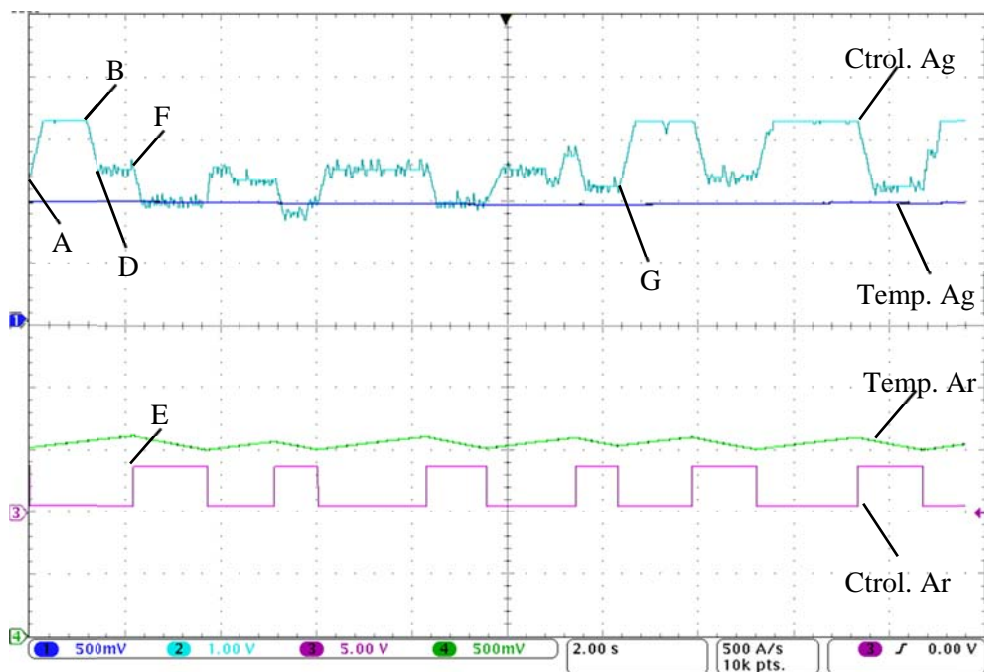


(b)

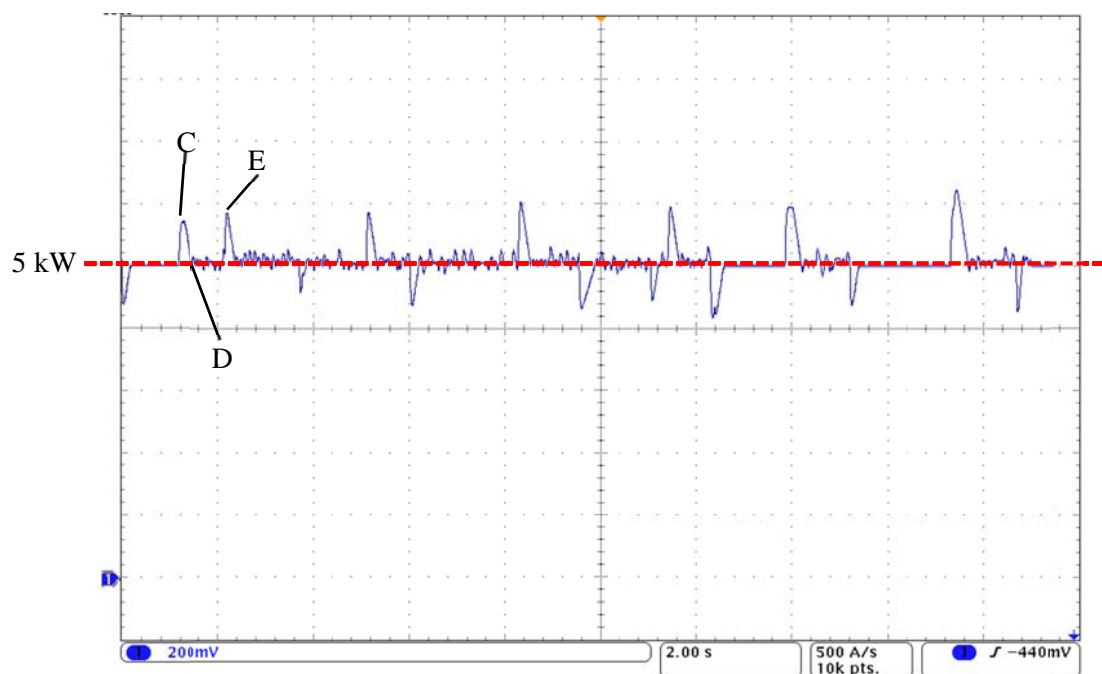
Figura 62 - Resultados experimentais do CDA com limitador de demanda em 5 kW.
 (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.
 Fonte: Autoria Própria.

Na sequência foi realizado outro ensaio acionando as CI da residência. O controlador de demanda continuou parametrizado com o limite de demanda em 5 kW e se realizou novamente o acionamento da vazão. O resultado do ensaio pode ser visualizado na Figura 63a e Figura 63b.

Inicialmente no instante “A” na Figura 63a, o aquecimento de água é incrementado até o valor máximo sem que a demanda ultrapasse o limite.



(a)



(b)

Figura 63 - Resultados experimentais do CDA com limitador de demanda em 5 kW, acionamento de CI. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.

Fonte: Autoria Própria.

A partir do momento “B” são ativadas as CI. O acionamento das CI causa a ultrapassagem do limite de demanda conforme indicado em “C”. Ao ser ultrapassado o limite de demanda o sinal de controle do aquecimento de água, é decrementado até que a demanda da residência fique abaixo do limite, conforme indicado em “D”. Na sequência é acionado o ar condicionado no momento “E” o que resulta novamente na ultrapassagem do limite de demanda. A partir desse instante o controlador diminui novamente o sinal de controle do aquecimento de água conforme representado em “F” para que a potência da residência fique abaixo do limite de demanda. No momento “G” as CI são desligadas e dessa forma é disponibilizado mais potência para ser utilizada pelo aquecimento de água que é incrementado nesse momento.

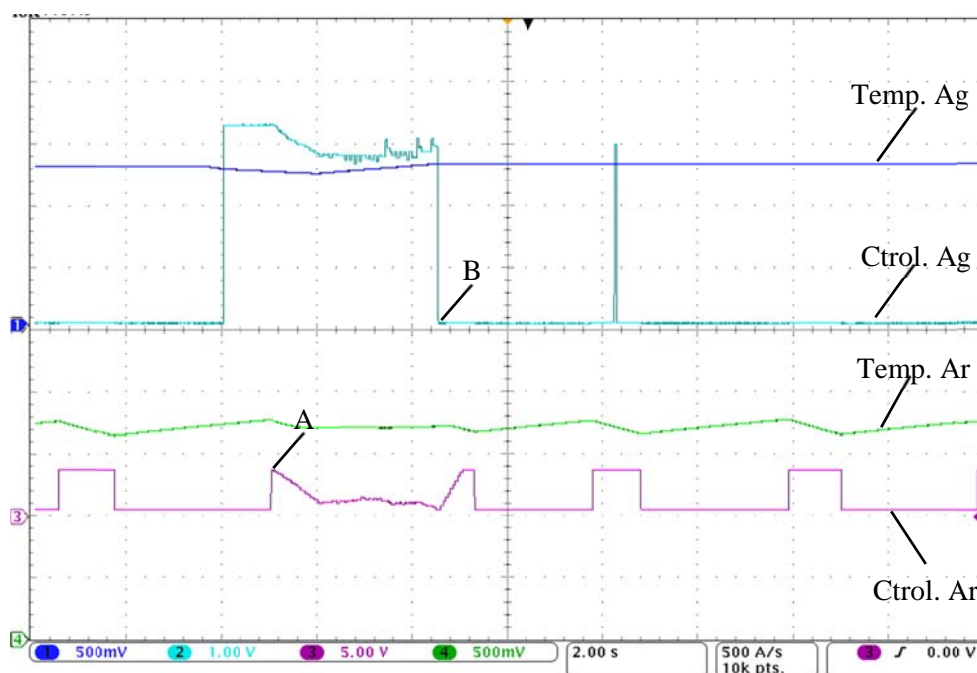
6.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CDAP

A obtenção dos resultados experimentais da implementação do CDAP, foi realizada utilizando o mesmo método de medição apresentado anteriormente nos ensaios do CDA.

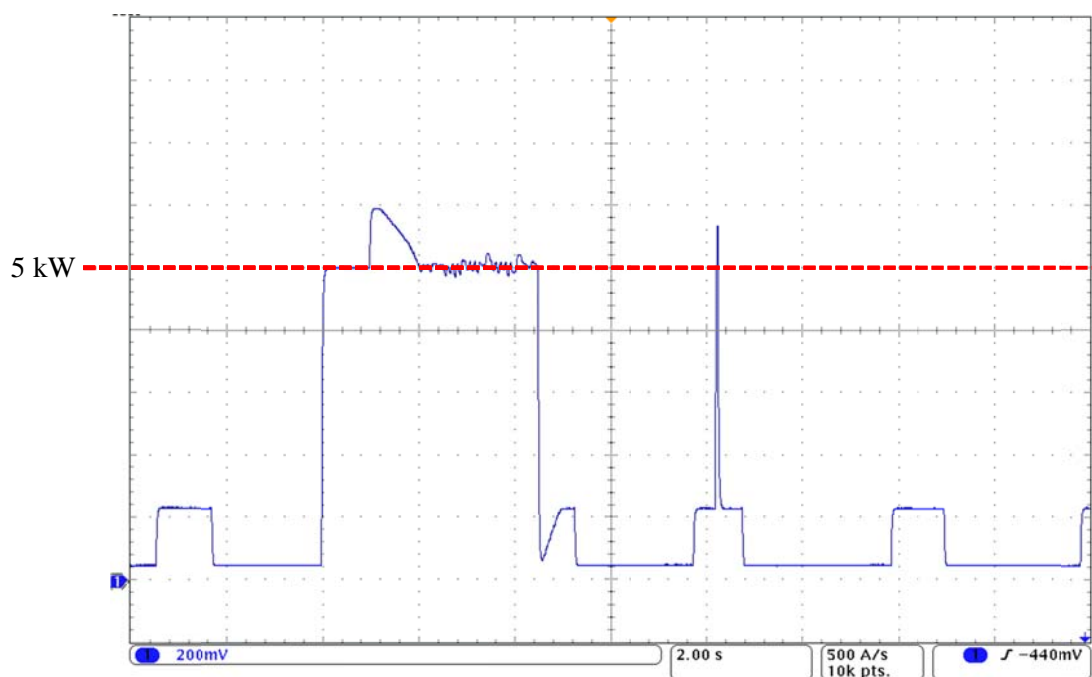
Inicialmente o controlador de demanda foi parametrizado sem atuação do limitador de demanda, os resultados desse ensaio foram muito semelhantes aos resultados apresentados anteriormente para o CDA com o limitador de demanda desativado. Posteriormente foram realizados ensaios com o limitador de demanda em 5 kW e com valores diferentes para os ganhos de carga, durante esses ensaios a vazão foi mantida sempre ativada para forçar o acionamento do aquecimento de água.

No primeiro ensaio com limitador de demanda ativo, foram parametrizados ganhos de carga iguais com o valor de 0,5 para o aquecimento de água e para o ar condicionado. Nas Figura 64a e Figura 64b são apresentados os resultados dos ensaios.

É possível observar que o instante “A” ocorre o acionamento do ar condicionado em um mesmo período que o aquecimento de água está ativo, isto causa a ultrapassagem do limite de demanda. Logo que o limite é ultrapassado o controlador de demanda começa a decrementar de forma ponderada a potência de aquecimento de água e potência do ar condicionado. A partir do instante “B” a temperatura da água chega ao valor desejado, dessa forma o aquecimento de água é desativado. Com a desativação do aquecimento de água o controlador de demanda pode incrementar o ar condicionado até sua potência máxima sem que o limite de demanda seja ultrapassado. Em seguida o ar condicionado é desligado, pois a temperatura ambiente atinge o valor desejado.



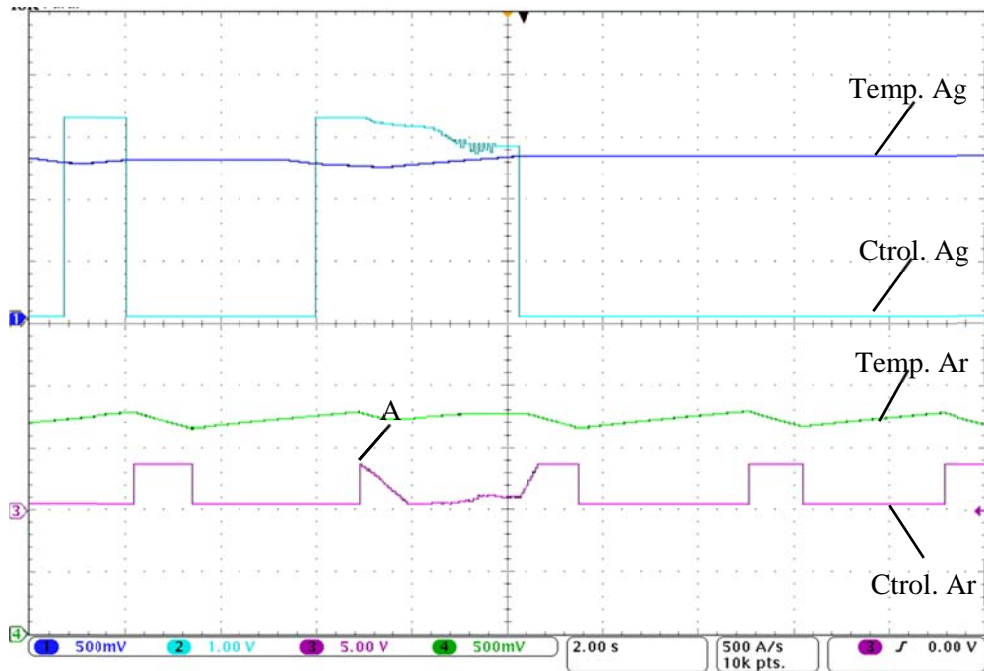
(a)



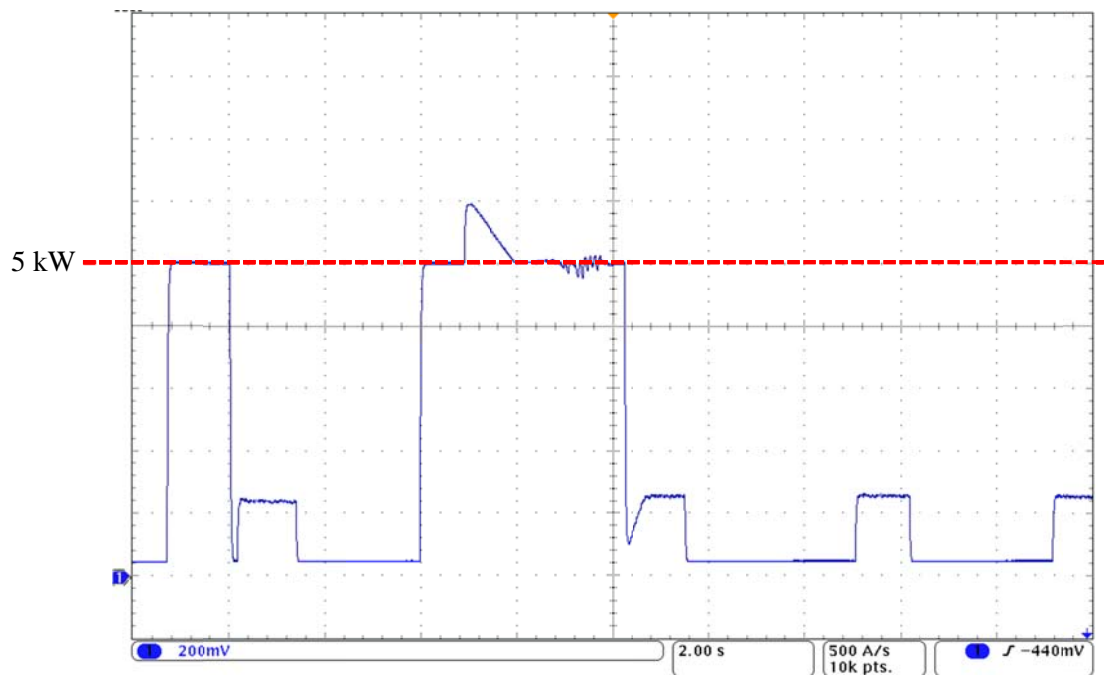
(b)

Figura 64 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência. Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente foi realizado novamente o ensaio priorizando o aquecimento de água que foi parametrizado com o ganho de carga com o valor de 0,8, enquanto que o ar condicionado foi parametrizado com o valor de 0,2 de ganho de carga. Os resultados são apresentados nas Figura 65a e Figura 65b.



(a)



(b)

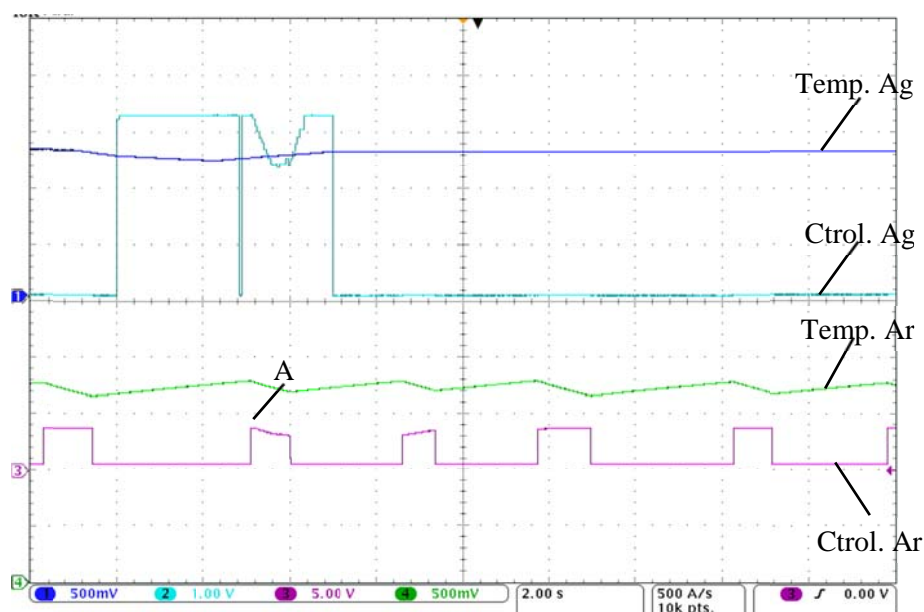
Figura 65 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. Ganho de carga 0,8 para aquecimento de água e ganho de carga 0.2 para o ar condicionado (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.

Fonte: Autoria Própria.

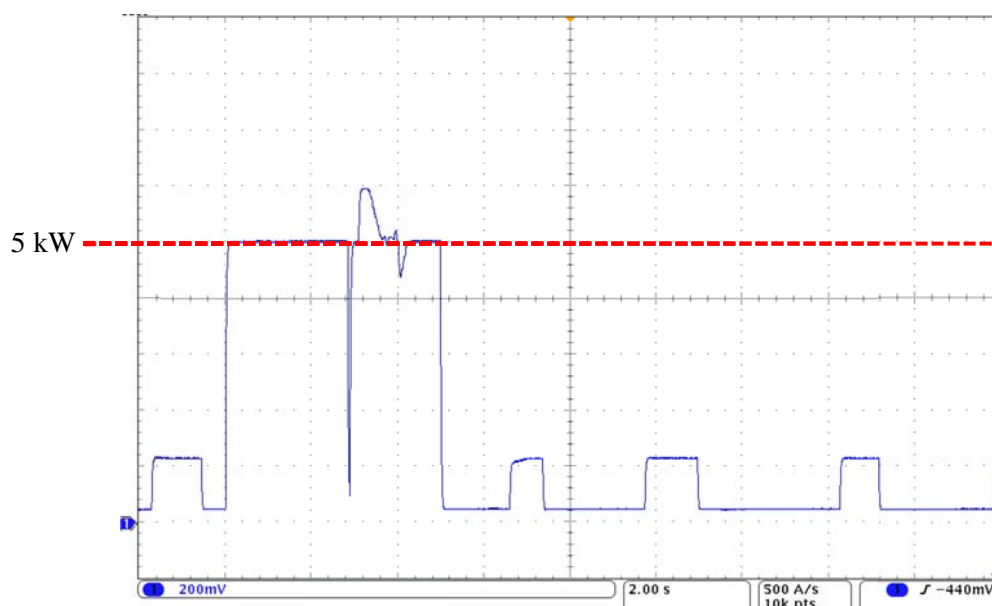
Observa-se na Figura 65a que ao ser ativado o ar condicionado no instante “A” o controlador de demanda inicia o decremento poderado da potência das cargas para diminuir a demanda de energia da residência. É possível verificar um decremento um pouco mais

acentuado no sinal de controle do ar condicionado, quando comparado com o decremento apresentado no ensaio anterior. Isso ocorre pois o ganho de carga da água foi parametrizado com um valor mais baixo que no ensaio anterior. O sinal de controle de aquecimento de água é menos decrementado pois teve um valor mais elevado parametrizado de ganho de carga.

Os resultados do próximo ensaio estão apresentados nas Figura 66a e Figura 66b



(a)



(b)

Figura 66 - Resultados experimentais do CDAP com limitador de demanda em 5 kW. Ganho de carga 0,2 para aquecimento de água e ganho de carga 0.8 para o ar condicionado (a) Sinais de controle das cargas; (b) consumo total de energia da residência.

Fonte: Autoria Própria.

Nesta simulação foi parametrizado o ganho de carga da água em 0,2 e o ganho de carga do ar para 0,8, dessa forma priorizou-se mais o acionamento do ar condicionado do que o acionamento do aquecimento de água. Novamente durante o ensaio, o ar condicionado é acionado enquanto o aquecimento de água está ativo, conforme apresentado no instante “A”. Verifica-se nos resultados desse ensaio, que o decremento realizado no sinal de controle do ar condicionado é pouco acentuado, quando comparado aos resultados dos ensaios anteriores. Para o aquecimento de água ocorre um decremento mais significativo no sinal de controle devido a parametrização de um baixo ganho de carga.

6.6 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a implementação da plataforma de ensaios utilizada para obtenção dos resultados experimentais dos algoritmos de controle de demanda analisados e propostos neste trabalho. Inicialmente foram apresentados os resultados da implementação do emulador de consumo de energia residência. No emulador foram implementados os modelos discretizados do reservatório de aquecimento de água e modelo térmico de um ambiente climatizado. Os resultados obtidos do emulador foram compatíveis com os resultados simulados e dessa forma foi possível validar a implementação HIL do emulador.

Na sequência foram implementados os novos algoritmos de controle de demanda desenvolvidos neste trabalho. Inicialmente foi implementado o CDA e posteriormente o CDAP. Através dos resultados obtidos foi possível validar a implementação dos algoritmos em sistemas embarcados, de forma a possibilitar a instalação dos controladores em ambientes residenciais.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem de controle de demanda com objetivo de diminuir a demanda de energia elétrica de consumidores de baixa tensão. Os algoritmos de controle de demanda foram simulados computacionalmente e posteriormente implementados em uma plataforma de ensaios para a obtenção de resultados experimentais.

Inicialmente foi apresentado o perfil de consumo de cargas residenciais no Brasil, foi possível identificar que para a região Sul o ar condicionado e o aquecimento de água são as cargas que mais consomem em uma residência, ainda televisores, iluminação e geladeira também apresentaram níveis significativos de consumo. Baseado nesses dados foi desenvolvido um emulador de consumo de energia elétrica residencial, que foi utilizado como planta de aplicação para os controladores de demanda. O emulador foi constituído por modelos matemáticos do ar condicionado e aquecimento de água disponíveis na literatura, para verificar o comportamento dinâmico os modelos foram simulados computacionalmente e os resultados obtidos foram equivalentes aos apresentados nos modelos na literatura. A modelagem e simulação possibilitaram a análise de forma mais detalhada do consumo de energia elétrica em uma residência.

Após as simulações do emulador, foi apresentado e simulado um algoritmo de controle de demanda baseado em prioridades (CDBP) disponível na literatura e em seguida os novos algoritmos propostos neste trabalho (CDA e CDAP). Os resultados da simulação do CDBP demonstraram que não foi possível o acionamento de duas cargas em um mesmo período, caso o limite de demanda fosse ultrapassado. Esta ação garantiu que a demanda da residência se mantivesse abaixo do limite desejado, entretanto pode-se observar que o nível de conforto ficou significativamente comprometido, uma vez que o usuário não pode utilizar mais de uma carga por período. Observou-se que o limite mínimo de demanda que pôde ser configurado para o CDBP foi de 5 kW, ao se utilizar um limite de demanda abaixo deste valor o CDBP não obteve resultado satisfatório, visto que não foi mais possível se ativar o aquecimento de água sem com que a demanda não fosse ultrapassada.

Na sequência foram apresentados e simulados os algoritmos de controle de demanda adaptativo baseado na busca Rosenbrock. Através dos resultados das simulações se observou que estes algoritmos possibilitaram o acionamento de duas cargas em um mesmo período sem ultrapassar o limite de demanda. No CDA as cargas foram classificadas por prioridades, a carga com maior prioridade foi ativada com sua potência total, e a carga menos prioritária foi ativada gradativamente até um valor máximo de potência em que o consumo total da

residência não ultrapassou o limite de demanda desejado. Em razão da possibilidade de ativação de duas cargas em um mesmo período, se observou níveis semelhantes de conforto do usuário ao se comparar os resultados obtidos com o limitador de demanda atuando e os resultados sem o controle de demanda. No CDAP foi possível realizar o acionamento gradual das duas cargas. Foi considerado para o sinal de controle das cargas o nível de erro de conforto e também ganhos de carga. Essa estratégia de acionamento ponderado para as duas cargas, possibilitou um controle mais flexível em que o usuário pode priorizar mais uma carga que outra sem deixar de ter um acionamento equilibrado entre as cargas. Se observou que para o CDA e o CDAP, o limite mínimo de demanda que pôde ser configurado sem prejudicar a operação dos algoritmos foi de 3 kW, abaixo desse valor o CDA e o CDAP não conseguiram manter os valores de temperatura dentro dos níveis de conforto dos usuários.

A implementação do emulador de consumo de energia elétrica residencial em uma plataforma HIL foi apresentada no Capítulo 5. A estratégia HIL possibilitou a representação de forma minimizada de uma planta real de aplicação para os ensaios dos controladores de demanda. Utilizando esta abordagem foi possível realizar modificações nos parâmetros da planta ao longo dos ensaios de forma rápida e confiável. Tais características não são obtidas de forma ágil utilizando um protótipo real, pois dependendo do parâmetro a ser modificado é necessária a remontagem dos componentes do protótipo tomando tempo e espaço. Ainda, a HIL possibilitou maior realismo que as simulações, fornecendo acesso a recursos de *hardware* que não estavam disponíveis em modelos de simulação de *software*.

Os resultados experimentais obtidos a partir da implementação dos novos algoritmos de controle de demanda apresentados neste trabalho, apresentaram um comportamento dinâmico muito semelhante aos resultados dos algoritmos simulados. Dessa forma foi possível validar a implementação do controlador de demanda em sistemas embarcados reais para utilização em consumidores de baixa tensão.

As principais contribuições geradas deste trabalho foram:

- Desenvolvimento de um emulador de consumo de energia residencial;
- Análise e comparação experimental de algoritmos de controle de demanda;
- Proposta, implementação e validação experimental de novos algoritmos de controle de demanda.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser abordados os seguintes tópicos:

- Implementação de um canal de comunicação Ethernet ou de outro tipo no controlador de demanda para troca de dados com a concessionária;

- Implementação de uma rede de comunicação para medição de consumo de energia das cargas na residência;
- Implementação de mais cargas residenciais controláveis de forma gradual;
- Implementação experimental em uma planta real de aplicação.

REFERÊNCIAS

ABDO, J. M. M. Resolução ANEEL n. 090, de 27 de março de 2001 (Diário Oficial, de 28 mar. 2001, seção 1, p. 175). Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2001. Acesso em: 20 Novembro 2012.

ANEEL. Processo 48500.004247/2009-37. ANEEL, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500.004247-2009-37.pdf>. Acesso em: 4 Abril 2014.

ANEEL. Tarifa branca ao consumidor de baixa tensão. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4921&id_area=90>. Acesso em: 10 Outubro 2012.

ANVISA. Resolução - RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003, 2003. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/d094d3004e5f8dee981ddcd762e8a5ec/Resolucao_RE_n_09.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: 14 Julho 2014.

CERCHIARO, D. F. Controle de Temperatura de um Trocador de Calor. Biblioteca Digital USP, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-30052006-224625/pt-br.php>>. Acesso em: 21 Março 2013.

COMPACT, C. L. Residential Smart Home Energy Monitoring Final Evaluation Report. Cape Light Compact, 2010. Disponível em: <<http://www.capelightcompact.org/library/2010/08/3.31.10-Residential-Smart-Home-Energy-Monitoring-Final-Evaluation-Report.pdf>>. Acesso em: 10 Janeiro 2013.

DEMEC. Carga Térmica e Climatização. DEMAC, 2010. Disponível em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM182/CLIMATIZACAO/apostila/5_CARGA%20TERMICA%20EM%20CLIMATIZACAO.pdf>. Acesso em: 20 Janeiro 2014.

ENERGY, A. Austin Energy Smart Grid Program. Austin Energy, 2013. Disponível em: <<http://www.austinenergy.com/about%20us/company%20profile/smartGrid/index.htm>>.

Acesso em: 14 Janeiro 2013.

FALCO, G. D. P. Perfil Econômico do Consumidor Residencial de Energia Elétrica do Período Entre 1994-2003. Instituto Vianna Júnior, 2010. Disponível em: <<http://www.viannajr.edu.br/site/viannasapiens/artigos/artigo06.pdf>>. Acesso em: 15 Janeiro 2013.

HAN, J. et al. Green Home Energy Management System through comparison of energy usage between the same kinds of home appliances. Consumer Electronics (ISCE), 2011 IEEE 15th International Symposium on, Singapore, Junho 2011. 4.

JING, J.; XUESONG, Z. Inverter air-conditioning control system using PID fuzzy controller. Control and Decision Conference (CCDC), 2011 Chinese, Mianyang, 3465-3470 Maio 2011.

LAFAY, J.-M. S. Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás, 2005. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/lafay.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

LEEPHAKPREEDA, T. Implementation of adaptive indoor comfort temperature control via embedded system for air-conditioning unit. Journal of Mechanical Science and Technology 26, 2012.

LI, J. et al. On The Design and Implementation of a Home Energy Management System. Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), 2011 6th International Symposium on, Hong Kong, Fevereiro 2011. 6.

LOBÃO, E. Balanço Energético Nacional 2012. Empresa de Pesquisa Energética., 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 16 Janeiro 2013.

LU, B. et al. A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Abril 2008. 919-931.

MACHADO, O. Demanda de Energia Elétrica – 10 anos. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf>. Acesso em: 9 Outubro 2012.

MORENO-EGUILAZ, J. et al. Induction motor optimum flux search algorithms with transient state loss minimization using a fuzzy logic based supervisor. Power Electronics Specialists Conference, 28th Annual IEEE, 1997.

MORISHITA, C. et al. Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas, 2010. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/catalogo_caixa_v4.PDF>. Acesso em: 20 novembro 2013.

OLIVEIRA, A. D. Palestra: Redes Elétricas do Futuro., 2011.

PAHWA, A.; BRICE, C. W. Modeling and System Identification of Residential Air Conditioning Load. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Junho 1985. 1418-1425.

PIPATTANASOMPORN, M.; KUZLU, M.; RAHMAN, S. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis. IEEE Transactions on Smart Grid, Dezembro 2012.

PROCEL. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005. Procel Info, 2007. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BE6AA7196-E64E-4FC0-9567-994B77FB24DE%7D%3B&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 17 Janeiro 2013.

PROCEL. SINPHA- Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos. Procel Info, 2007. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 17 Janeiro 2013.

RAHIMI, F.; IPAKCHI, A. Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market Paradigms. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Gaithersburg, 19-21 Janeiro 2010. 1-7.

SHAO, S.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Development of Physical-Based Demand Response-Enabled Residential Load Models. IEEE Transactions On Power Systems, 29 Março 2012.

XUE-SONG, Z.; LI-QIANG, C.; YOU-JIE, M. Research on Smart Grid Tecnology. International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM), Outubro 2010.