

**ALEXANDRE CORRÊA NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE  
DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

**FLORIANÓPOLIS, 2012**



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO (LATO SENSU) EM  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS**

**ALEXANDRE CORRÊA NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE  
DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Monografia submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Professor Orientador: Charles Borges de Lima. Dr Eng.

**FLORIANÓPOLIS, 2012**

CDD 629.895  
N922d

Nunes, Alexandre Corrêa

Desenvolvimento de um controlador de demanda de energia elétrica residencial [Monografia] / Alexandre Corrêa Nunes; orientação de Charles Borges de Lima. – Florianópolis, 2013.

1 v. : il.

Monografia de especialização (Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Inclui referências.

1. Medidores eletrônicos de energia. 2. Controladores de demanda. 3. Automação residencial. I. Lima, Charles Borges de. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC  
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis  
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065  
Rose Mari Lobo Goulart CRB 14/277





**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE  
DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

**ALEXANDRE CORRÊA NUNES**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Especialista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação (*Lato Sensu*) em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de dezembro de 2012.

Banca Examinadora:

---

Charles Borges de Lima, Dr. Eng.

---

Clovis Antônio Petry, Dr. Eng.

---

Marcos Valério Miorim Villaça, Dr. Eng.





*Dedico este trabalho à minha esposa Rosinea  
e a meus filhos Livian e Nicolas pelas horas e períodos  
de ausência que, pacientemente souberam esperar.*



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, por me proporcionarem as condições para que atingisse mais este marco em minha vida.

Ao orientador Charles Borges de Lima, pela orientação e ajuda dispensada durante o desenvolvimento deste trabalho.

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.



“Não basta o quase, o safo, o improviso. Tem de ser perfeito, correto, eficaz, nem mais, nem menos”.

(Roberto Valadares Caiafa)



## RESUMO

O presente trabalho é resultado de uma pesquisa aplicada ao desenvolvimento de um controlador de demanda de energia elétrica voltado a pequenos e médios consumidores e sua integração a um medidor eletrônico de energia.

**Palavras-chave:** Medidores eletrônicos de energia. Controladores de demanda. Automação residencial.





## **ABSTRACT**

This work is the result of an applied research development for control demand off electric power for to small and medium consumers and its integration into an electronic power meter.

**Key-words:** Electronic Energy Meters. Controllers Demand. House automation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Curva de carga desagregada por tipo de consumidor.....	32
FIGURA 2 - Medidor eletrônico de energia elétrica.....	36
FIGURA 3 - Método de medição assíncrona janela móvel.....	42
FIGURA 4 - Algoritmo reta de carga.....	43
FIGURA 5 - Método preditivo adaptativo. ....	44
FIGURA 6 - Topologias da rede Zigbee. ....	47
FIGURA 7 - CPU Arduino.....	49
FIGURA 8 - Interface IDE do Arduino.....	50
FIGURA 9 - App Inventor Designer. ....	52
FIGURA 10 - App Inventor block editor. ....	53
FIGURA 11 - Diagrama do projeto.....	56
FIGURA 12 - Ethernet <i>shield</i> .....	58
FIGURA 13 - Modelos de módulos zigbee Maxstream. ....	59
FIGURA 14 - Software de configuração dos módulos zigbee. ....	60
FIGURA 15 - Rotina de monitoração. ....	62
FIGURA 16 - Rotina de controle de demanda. ....	63
FIGURA 17 - Rotina de comunicação. ....	64
FIGURA 18 - Aplicativo para Android.....	65
FIGURA 19 - Fonte de alimentação do módulo de controle de carga. .	68

FIGURA 20 - Esquema módulo de acionamento.....	68
FIGURA 21 - Kit de desenvolvimento de medidor eletrônico. ....	69
FIGURA 22 - Banco de carga para teste. ....	70
FIGURA 23 - Analisador de potência Fluke 41b.....	71
FIGURA 24 - Conexão para teste. ....	72
FIGURA 25 - Placa de controle e ponto de acionamento .....	72
FIGURA 26 - Gráfico de controle .....	73
FIGURA 27 - Gráfico de carga controlada e carga solicitada. ....	74

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Características placa Arduino.....	57
TABELA 2 - Características ethernet <i>shield</i> .....	58
TABELA 3 - Parâmetros programados para ensaio.....	71



## **ABREVIATURAS**

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

COPEL- Companhia Paranaense de Energia.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais.

CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina.

COELCE - Companhia Energética do Ceará.

SPI - *Serial Peripheral Interface*.

ISM - *Industrial, científico and médico*.





## SUMÁRIO

RESUMO .....	13
ABSTRACT.....	15
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	27
LISTA DE TABELAS .....	19
ABREVIATURAS.....	27
1 INTRODUÇÃO .....	25
1.2 Objetivo Geral.....	26
1.3 Objetivos Específicos .....	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Métodos de Tarifação.....	27
2.1.1 Classificação dos Consumidores .....	28
2.1.2 Tarifação Convencional .....	29
2.1.3 Tarifação Horo Sazonal.....	30
2.2 Medidores de Energia Elétrica .....	33
2.2.1 Medidores Eletrônicos Energia Elétrica .....	35
2.2.1.1 Princípios de Operação.....	36
2.2.1.2 Precisão .....	37
2.2.1.3 Limitações .....	37
2.3 Demanda de Energia Elétrica .....	38
2.3.1 Demanda Máxima, Medida e Média .....	38
2.3.2 Demanda contratada, faturável e ultrapassagem .....	39
2.3.3 Demanda Controlável e não Controlável .....	39
2.4 Controladores de Demanda .....	39
2.4.1 Funcionamento .....	40

2.4.2 Métodos de Medição e Controle de Demanda .....	40
2.4.2.1 Método de Controle das Retas de Carga .....	42
2.4.2.2 Método Preditivo Adaptativo .....	43
2.5 Zigbee .....	45
2.5.1 Funcionamento.....	46
2.5.2 Estrutura da Rede Zigbee.....	46
2.5.3 Segurança da Rede Zigbee .....	46
2.6 Arduino .....	48
2.6.1 Hardware do Arduino.....	48
2.6.2 Software do Arduino.....	49
2.7 Android .....	50
2.8 APP Inventor.....	51
2.8.1 App Inventor Designer.....	52
2.8.2 App Inventor Blocks Editor .....	52
3 DESENVOLVIMENTO .....	55
3.1 Características do Equipamento.....	55
3.2 Definição da Plataforma de Hardware. ....	56
3.3 Projeto do Firmware.....	61
3.4 Projeto do Aplicativo para Android .....	64
3.5 Desenvolvimento do Hardware de Acionamento.....	66
3.5.1 Módulo de Acionamento.....	67
4 RESULTADOS.....	69
4.1 Teste de Controle de Carga.....	73
5 CONCLUSÃO .....	75
5.1 Propostas para Trabalhos Futuros .....	77
REFERÊNCIAS.....	79

# 1. INTRODUÇÃO

O uso de controladores de demanda máxima nas instalações atendidas por contratos de fornecimento horo-sazonal é uma forma de garantir que o sistema não ultrapasse os limites contratuais, resultando em aplicação de multas.

Com uma nova regulamentação relacionada a tarifas diferenciadas de energia elétrica para unidades atendidas em baixa tensão, a utilização de controladores de demanda pode trazer a essa classe de consumidores os benefícios do gerenciamento de energia, reduzindo perdas e em muitos casos permitindo a diminuição no valor da fatura de energia.

Pelo ponto de vista do fornecimento, a existência de um controle de demanda nas unidades consumidoras permite um melhor planejamento e maior aproveitamento do sistema de distribuição, minimizando investimentos no setor.

A estrutura tarifária, hoje na forma da Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 456 de 29 de novembro de 2000, já inclui a tarifação sobre a demanda, que na tarifa de energia elétrica representa a estrutura de geração e transmissão que a concessionária disponibiliza para o consumidor respondendo tipicamente por 20% dessa, representando, portanto, um insumo significativo. No ano de 2010 a ANEL publicou a resolução normativa nº 414 que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica no território, substituindo, entre outras, a resolução normativa nº 456 de 29 de novembro de 2000.

Com base nas pesquisas e dados supracitados, durante este trabalho será montado um protótipo de um controlador de demanda e de um ponto de controle de consumo de energia elétrica.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é projetar um controlador de demanda residencial de menor custo e fácil instalação possibilitando aos pequenos e médios consumidores o acesso as vantagens desse tipo de equipamento.

## 1.3 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Projetar um sistema de controle de demanda que mantenha comunicação com o medidor de energia e atue sobre pontos de consumo.
- Projetar um ponto de controle de consumo de energia, de fácil instalação.
- Desenvolver uma interface de comunicação que possibilite monitorar dados de consumo e demanda de energia elétrica.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O objetivo deste capítulo é apresentar a fundamentação teórica tomada como base para realização deste trabalho. Serão apresentados os métodos de tarifação, modalidades tarifárias, medidores eletrônicos de energia elétrica, demanda de energia e métodos de controle de demanda. Na sequência serão estudadas características da plataforma selecionada para o desenvolvimento e os sistemas de comunicação empregados.

### **2.1 Métodos de Tarifação**

Para compreensão dos assuntos tratados neste trabalho, é necessário conhecer alguns conceitos e definições:

- a) Potência: é a capacidade de consumo de um equipamento elétrico, expressa em Watts (W) ou quilowatts (kW).
- b) Energia: é a quantidade de eletricidade utilizada por um aparelho elétrico ao ficar ligado por um determinado tempo. Tem como unidades mais usuais o quilowatt-hora (kWh) ou megawatt-hora (MWh).

Na conta de energia elétrica de pequenos consumidores, cobra-se apenas a energia utilizada (consumo). Médios e grandes consumidores pagam tanto pela energia quanto pela potência. A potência aparece nas contas desses consumidores com o nome de demanda, que na verdade, corresponde à potência média verificada em intervalos de 15 minutos (Procel, 2001).

- c) Horário de Ponta: é o período de três horas consecutivas compreendidas no intervalo entre 19:00 e 22:00 horas exceto sábados, domingos e feriados nacionais, definido pela concessionária em função das características de seu sistema elétrico. Em algumas modalidades tarifárias. Nesse horário a demanda e o consumo de energia elétrica têm preços mais elevados. O horário fora de ponta corresponde às demais 21 horas do dia. O sistema de geração de energia tem que ter capacidade de suprir o pico de consumo neste horário e no restante do tempo permanecer com a capacidade ociosa.

d) Demanda: de acordo com a resolução 414 da ANEEL de 09 de setembro de 2010: “Demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado”. No Brasil o intervalo de tempo (período de integração) é de 15 minutos, portanto, em um mês teremos: 30 dias x 24 horas / 15 minutos = 2880 intervalos (ABRACEEL, 2012).

e) Períodos Seco e Úmido: para efeito de tarifação, o ano é dividido em dois períodos, um período seco que compreende os meses de maio a novembro (7 meses) e um período úmido, que compreende os meses de dezembro a abril (5 meses). Em algumas modalidades tarifárias, o consumo tem preços mais elevados no período seco (PROCEL, 2012).

### **2.1.1 Classificação dos Consumidores**

De acordo com a ANEEL, os consumidores são classificados pelo nível de tensão em que são atendidos e divididos nos seguintes grupos:

- **Grupo A**

Unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 2,3 KV, ou atendidas em tensão inferior a 2,3 KV através de sistema subterrâneo de distribuição, e faturadas neste grupo, caracterizadas pela estruturação tarifária binômica e dividido em seis subgrupos de acordo com a tensão de fornecimento. São cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Estes consumidores podem enquadrar-se em uma de três alternativas tarifárias:

- Tarifação Convencional;

- Tarifação horo-sazonal Verde;

- Tarifação horo-sazonal Azul (compulsória para aqueles atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV).

- Grupo B

Unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 KV, ou ainda unidades atendidas em tensão superior a 2,3 KV e faturadas neste grupo, caracterizadas pela estruturação tarifária monômnia e dividido em sete subgrupos dentre estes o grupo B1 classificado como residencial. São cobrados apenas pela energia que consomem.

### **2.1.2 Tarifação Convencional**

O enquadramento na tarifa convencional exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor (“Demanda Contratada”), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido).

Nos consumidores enquadrados no Grupo B, apenas o consumo de energia é faturado, não existindo cobrança relativa à demanda de potência.

Os consumidores do Grupo A, subgrupos A3a, A4 ou AS, podem ser enquadrados na tarifa convencional quando a demanda contratada for inferior a 300 kW, desde que não tenham ocorrido, nos 11 meses anteriores, 3 (três) registros consecutivos ou 6 (seis) registros alternados de demanda superior a 300 kW.

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. A parcela de consumo é calculada multiplicando-se o consumo medido pela Tarifa de Consumo.

A parcela de demanda é calculada multiplicando-se a Tarifa de Demanda pela Demanda Contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em 10% a Demanda Contratada.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a Demanda Contratada. É calculada multiplicando-se a tarifa de ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a Demanda Contratada.

### **2.1.3 Tarifação Horo Sazonal**

Esta modalidade é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

A estrutura de tarifação horo sazonal pode ser aplicada segundo os seguintes modelos de tarifação:

a) Tarifa Verde

O enquadramento na tarifa Verde dos consumidores do Grupo A.

Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor (“Demanda Contratada”), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta). Embora não seja explícita, a Resolução 414 de 2010 da Anel, permite que sejam contratados dois valores diferentes de demanda, um para o período seco e outro para o período úmido. A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem.

A tarifa de demanda é única, independente da hora do dia ou período do ano. O limite de ultrapassagem em 5 % da demanda contratada para todos os consumidores é calculada multiplicando-se a Tarifa de Ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a Demanda Contratada.

b) Tarifa Horo-sazonal Azul



O enquadramento dos consumidores do Grupo A na tarifação horo-sazonal azul é obrigatório para os consumidores dos subgrupos A1, A2 ou A3.

Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua tanto o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta (Demanda Contratada na Ponta) quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta (Demanda Contratada fora de Ponta). Embora não seja explícita, assim como na tarifa verde, a resolução 414 permite que sejam contratados valores diferentes para o período seco e para o período úmido.

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. Em todas as parcelas observa-se a diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta (PROCEL- 2012).

A parcela de demanda é calculada somando-se o produto da Tarifa de Demanda na ponta pela Demanda Contratada na ponta (ou pela demanda medida na ponta, de acordo com as tolerâncias de ultrapassagem) ao produto da Tarifa de Demanda fora da ponta pela Demanda Contratada fora de ponta (ou pela demanda medida fora de ponta, de acordo com as tolerâncias de ultrapassagem). As tarifas de demanda não são diferenciadas por período do ano.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa a demanda contratada acima dos limites de tolerância de 5% para todos os consumidores

### c) Tarifa Amarela

A tarifa amarela é uma modalidade de tarifação horo-sazonal destinada à aplicação em unidades consumidoras de pequeno porte, especialmente as unidades residenciais. Tem como principal característica a diferenciação de valores na tarifa de consumo nos horários fora de ponta e nos horários de ponta, permitindo ao

consumidor obter significativa redução no valor do importe tarifário através do gerenciamento do horário de consumo (CELPA- 2012).

O dimensionamento do sistema de geração e distribuição é baseado no consumo máximo que ocorre no horário de pico ou de ponta (Aparecido, 2006, p29).

A figura 1 mostra uma curva de carga da CELESC onde a contribuição de diversos tipos de consumidores é apresentada. Nesse gráfico vê-se claramente que os principais responsáveis pelo aumento da carga nos horários de pico são os consumidores residenciais que é exatamente a classe que não está sendo contemplada com um sistema de tarifação diferenciada.

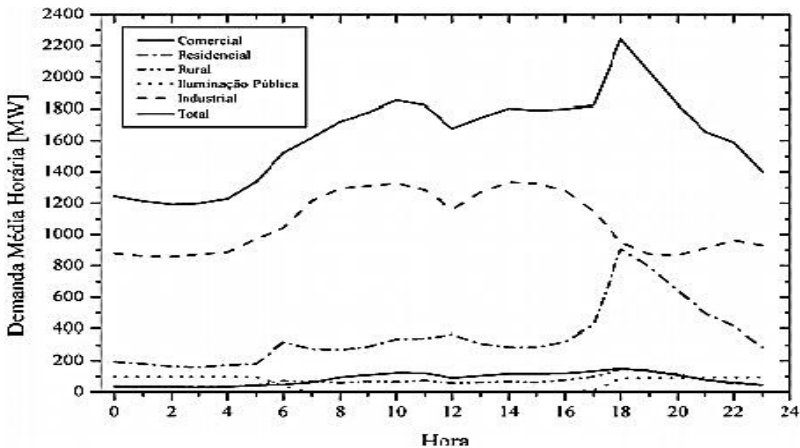


FIGURA 1 - Curva de carga desagregada por tipo de consumidor.  
Fonte: Celesc 2012.

O sistema de medição empregado na tarifa amarela prevê a medição do consumo no horário fora de ponta e no horário de ponta. Em relação aos valores cobrados, o consumo no horário de ponta tem preço significativamente maior que o valor do kWh na tarifa convencional, enquanto para o horário fora de ponta esse valor sofre um desconto sobre o valor da tarifa comum. Adicionalmente, a tarifa amarela reduziria ainda mais o custo da energia nas horas de demanda mínima

no sistema, de forma a incentivar o uso de equipamentos de grande consumo nesse horário.

#### d) Tarifa branca

No dia 22 de novembro de 2012, a ANEEL criou uma nova estrutura tarifária com o objetivo de oferecer uma cobrança diferenciada para consumidores residenciais e comerciais. A novidade desta estrutura foi a criação da tarifa branca que terá três pontos de medição: ponta, fora de ponta e intermediário. O consumidor, porém, terá a opção de adotar ou não a cobrança diferenciada, que será baseada nos horários de pico da área de concessão de cada distribuidora.

A tarifa branca será uma alternativa à convencional hoje em vigor e oferecerá três diferentes patamares para a tarifa de energia, de acordo com os horários de consumo. De segunda a sexta-feira, uma tarifa mais barata será empregada na maioria das horas do dia; outra mais cara, no horário em que o consumo de energia atinge o pico máximo, no início da noite; e a terceira, intermediária, será entre esses dois horários. Nos finais de semana e feriados, a tarifa mais barata será empregada para todas as horas do dia.

A ANEEL previa utilizar 2012 como “ano teste” da metodologia, mas a data foi alterada, passando 2013 a ser o marco inicial. Nesse ano, os consumidores poderão ver em suas contas o quanto pagariam caso a novidade já estivesse sendo adotada de fato. Em 2014, acabam os testes e a mudança vira realidade. Esta tarifa depende de medidores eletrônicos para ser adotada na prática.

## **2.2 Medidores de Energia Elétrica**

Por definição física, a potência elétrica, medida em Watts, é igual ao produto entre a diferença de potencial, em Volts, e a corrente elétrica circulante através do dispositivo, em Ampères.

Desse modo, para medir a potência elétrica de um determinado dispositivo, emprega-se um instrumento capaz de indicar o produto entre a tensão e a corrente no sistema a ser medido. E, dependendo da forma como esse produto é feito pode-se obter a indicação de potência ativa, reativa ou aparente.

Em circuitos de corrente alternada a característica reativa de certos componentes pode produzir potências de caráter complexo, exigindo que o sistema de medição seja capaz de medir separadamente as parcelas de potência ativa e potência reativa. (Matheus Henrique-2003). Por essa razão, os medidores de potência que operam em corrente alternada possuem uma construção e um princípio de operação capaz de realizar a separação vetorial da potência real, indicada como potência ativa, e da potência imaginária, indicada como potência reativa.

Para medição de potência ativa deve-se considerar apenas a componente real da potência aparente, para isso utiliza-se a seguinte equação:

$$P = V \times I \times \cos(\varphi) \text{ [W]}$$

Já a potência reativa é definida pela equação:

$$Q = V \times I \times \sin(\varphi) \text{ [Var]}$$

Em termos matemáticos, a energia elétrica consumida, ou simplesmente o consumo, pode ser medido através da integração da potência exigida pela unidade de consumo em um intervalo de tempo. A equação matemática que determina o consumo de energia elétrica de um circuito em um intervalo de tempo  $\Delta t = (t_2 - t_1)$  é:

$$E(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

Onde  $p$  é a potência instantânea.

Medidores de energia elétrica operam através da medição da tensão e corrente instantâneas, e através de seu produto determinam a

potência instantânea (em Watts) do circuito. A integração da potência medida ao longo do tempo fornece então a Energia Consumida, que é medida em Joules, Watts-hora ou seus derivados. Em aplicações comerciais, a unidade empregada é o kWh (Quilowatt-hora), energia equivalente a 3.600.000 Joules, que corresponde a uma carga de 1kW ligada durante 1 hora.

### **2.2.1 Medidores Eletrônicos Energia Elétrica**

Medidores eletrônicos de energia são instrumentos que empregam em sua operação circuitos eletrônicos para a medição da potência elétrica. Um exemplo de medidor eletrônico de energia elétrica é apresentado na Figura 2.

Nos medidores eletrônicos a corrente normalmente é medida por meio de transformadores de corrente, enquanto que a tensão pode ser medida tanto por divisores resistivos de alta impedância quanto por transformadores de tensão.

A forma para a apresentação do valor medido pode ser eletrônico, quando emprega mostradores de cristal líquido ou eletromecânico, quando o circuito medidor fornece a saída em forma de pulsos destinados ao acionamento de contadores eletromecânicos de pulsos ou motores de passo acoplados a contadores mecânicos.

A maioria dos medidores de energia eletrônicos incorpora outras funções, como a possibilidade de comunicação com dispositivos externos via porta serial ou por pulsos, a capacidade de armazenamento das leituras em memória interna, a medição de energia reativa e de demanda incorporadas e recursos para a aplicação de tarifas horazonais. Isso leva à utilização destes medidores como elemento sensor de sistemas de gerenciamento de energia, ao mesmo tempo em que operam como registradores de consumo para o faturamento pela concessionária.



FIGURA 2 - Medidor eletrônico de energia elétrica.  
Fonte: Nansen 2012.

### 2.2.1.1 Princípios de Operação

Os medidores eletrônicos de energia são baseados em circuitos conversores analógico-digitais e em processadores digitais de sinal capazes de realizar a amostragem das tensões e correntes do sistema de alimentação e convertê-las em valores proporcionais à potência do sistema medido.

Circuitos eletrônicos destinados ao processamento digital de sinais possuem melhor desempenho que os circuitos analógicos nas aplicações de medição de energia, apresentando melhor estabilidade, facilidade de composição por elementos programáveis, facilidade na calibração e custo com forte tendência à redução em virtude das novas técnicas de integração disponíveis (Collins, 1999).

Medidores eletrônicos de energia operam a partir de transdutores convencionais (resistências de derivação, transformadores de corrente, sensores de efeito hall), podendo medir potência em circuitos de corrente alternada e de corrente contínua.

### **2.2.1.2 Precisão**

Medidores eletrônicos de energia são construídos normalmente na classe 0,8, podendo em casos de instrumentação científica alcançar a precisões na faixa de 50 partes por milhão (PPM). A facilidade em se obter instrumentos de precisão mais elevada decorre principalmente do fato de inexistir limitações mecânicas nos elementos envolvidos no processo de medição e registro, e também à possibilidade de se empregar sensores de maior precisão e alcance dinâmico.

### **2.2.1.3 Limitações**

O emprego de circuitos e dispositivos baseados em semicondutores aumenta a sensibilidade desses componentes a surtos de tensão eventualmente presentes no sistema de distribuição. Especial cuidado deve ser tomado durante o projeto destes instrumentos para que eventos espúrios não comprometam o correto funcionamento dos componentes sensíveis, preservando a confiabilidade e precisão do equipamento de medida. Outra limitação eventualmente presente nesse tipo de medidor é a ausência de indicação durante a interrupção de alimentação.

## **2.3 Demanda de Energia Elétrica**

A demanda representa a estrutura de geração e transmissão da energia elétrica que a concessionária disponibiliza ao consumidor. Ela é disponibilizada perante contrato com a concessionária, onde esta se responsabiliza em manter a estrutura de fornecimento e o consumidor, por sua vez, compromete-se a pagar por essa estrutura, usando-a ou não, e ele também não deve ultrapassar os valores contratados podendo ser cobradas multas, caso isso ocorra, já o consumo representa a quantidade de energia ativa consumida (Matheus Henrique2003). A demanda serve para dimensionar e pagar a implantação e conservação dos ativos, materiais e equipamentos, necessários ao transporte da energia elétrica entre a distribuidora e a unidade consumidora. A concessionária cobra pela maior demanda registrada no mês, sendo no mínimo igual à contratada. Além da demanda, há ainda a fatura do consumo que nada mais é do que a energia consumida no mês em kWh.

### **2.3.1 Demanda Máxima, Medida e Média**

Segundo a Resolução 414 da ANEEL, a demanda Máxima de potência é a maior média das potências elétricas verificadas em um intervalo de tempo, que no Brasil é de 15 minutos, durante o período de faturamento (expressa na unidade de kWh). A demanda máxima pode ser dividida em máxima de ponta e máxima fora de ponta, que são os valores máximos estabelecidos no contrato de fornecimento, para o horário de ponta e fora de ponta.

A demanda medida é a maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento, e é expressa em quilowatts (kW).

Já a demanda média é a relação entre a quantidade de energia elétrica (kWh) consumida durante certo período de tempo e o número de horas desse período.



### **2.3.2 Demanda Contratada, Faturável e Ultrapassagem**

Demanda contratada é a demanda de potência ativa que a concessionária é obrigada a disponibilizar continuamente, no ponto de entrega, conforme o valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em kW.

Demanda faturável é o valor da demanda de potência ativa, identificado de acordo com os critérios estabelecidos e considerados para fins de faturamento, com a aplicação da respectiva tarifa, expressa em kW (ANDREOLI; *Eteal*, 2012, p2).

A demanda de ultrapassagem é a parcela da demanda medida que excede a demanda contratada, expressa em kW.

A cobrança da demanda é determinada pela demanda contratada, porém se houver ultrapassagem, será determinada pela demanda medida.

### **2.3.3 Demanda Controlável e não Controlável**

a) Demanda controlável: é a parcela da carga instalada que possibilita um remanejamento dinâmico durante o processo, de forma a possibilitar a redução da demanda da instalação.

b) Demanda não controlável: é a parcela da carga instalada que não permite desligamento sem prejuízo ao processo e, portanto, não é passível de desligamento automático pelo controlador de demanda.

## **2.4 Controladores de Demanda**

Controlador de demanda é um equipamento eletrônico que tem como função principal manter a demanda de energia ativa de uma unidade consumidora dentro de valores limites pré-determinados,

atuando se necessário, sobre alguns dos equipamentos (cargas) da instalação e segundo as regras de faturamento vigentes. A maior parte dos controladores de demanda controla também o fator de potência e o consumo de energia.

“Controlar a demanda é fundamental, não só para o consumidor diminuir seus custos com energia elétrica, mas também para a concessionária que necessita operar de forma bem dimensionada, evitando interrupções ou má qualidade de fornecimento” (Gestal, 2012).

### **2.4.1 Funcionamento**

Um controlador de demanda necessita medir corretamente para poder controlar. A informação para controle deverá vir do medidor de energia cedido pela concessionária: são os sinais de controle além das variáveis a serem controladas; liberadas pela concessionária através de solicitação padrão.

Logo, o controlador de demanda deverá estar conectado ao medidor recebendo as mesmas informações da concessionária e baseado nessas, realizar suas ações sobre as cargas passíveis de serem controladas. Uma vez recebido os sinais da concessionária o controlador de demanda passará a verificar, dentro de cada período de integração (quase 3000 intervalos/mês), a necessidade de se retirar ou não alguma carga elétrica da instalação, afim de que a demanda global se mantenha, dentro do intervalo, abaixo dos limites de controle pré- estabelecidos (os quais na maioria das vezes são os valores de contrato junto à concessionária com ou sem as tolerâncias permitidas).

### **2.4.2 Métodos de Medição e Controle de Demanda**

Para que se realize o controle da demanda de uma instalação, é necessário que se empregue uma estratégia baseada nos dados obtidos

através de medições que indiquem os procedimentos e ações de controle a serem executadas (ANDREOLI; *Eteal*, p2, 2012).

São os métodos de controle que determinam a maior ou menor precisão do controlador e o grau de interferência que o mesmo irá imprimir ao processo produtivo.

Em termos de medição têm-se os métodos de medição síncrona e assíncrona. O método de medição síncrona é aquele utilizado por todas as concessionárias brasileiras, sendo que na legislação brasileira esse período é de 15 minutos, tendo início e fim bem definidos.

Na prática o que se faz é integrar os pulsos de energia dentro do intervalo, chamado de intervalo de integração, obtendo o que é chamado de demanda de energia ativa. Na maioria dos casos a concessionária fatura pelos maiores valores registrados nos períodos fora-ponta e na ponta ou pelos valores contratados, os que forem maiores. A cada início do intervalo de integração o consumo é zerado dando início a uma nova contagem. Se ao final do intervalo o valor médio de consumo for superior ao limite permitido, o usuário arcará com multas por ultrapassagem.

O método de medição assíncrona, muito utilizado por tradicionais fabricantes de controladores de demanda, é a chamada média móvel ou ainda janela móvel, a qual não se vale do sinal de sincronismo da concessionária. A janela móvel na verdade é um filtro de média móvel que “caminha” a cada período de atuação do controlador trazendo consigo todo o histórico (inércia) do período de integração anterior.

A medição por janela móvel conforme Figura 3, traz consigo um valor médio acumulado do período imediatamente anterior ao invés de entrar “zerado” como o faz o método de medição síncrona.

Outra característica de medição por janela móvel é que traz consigo toda a inércia do intervalo anterior prejudicando o controle das cargas na passagem do período fora de ponta para ponta, retirando cargas desnecessariamente.

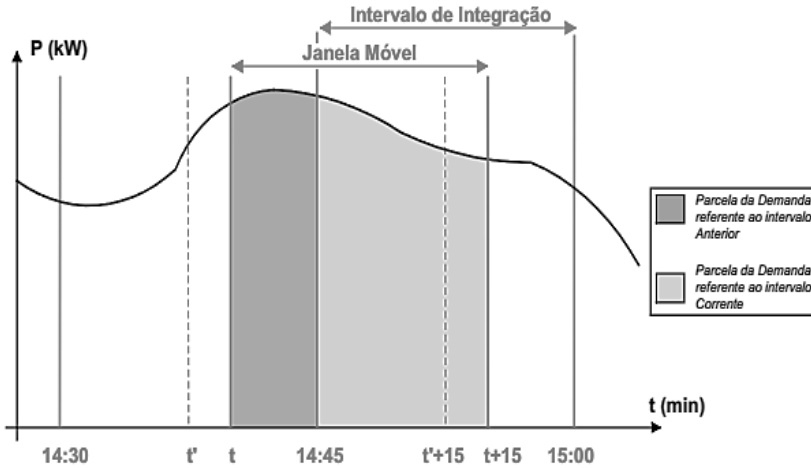


FIGURA 3 – Método de medição assíncrona janela móvel.

Fonte: Gestal 2012.

#### 2.4.2.1 Método de Controle das Retas de Carga

O algoritmo de reta de carga Figura 4, realiza a composição da curva de demanda através da realização de seguidas projeções, baseadas em cálculos do tipo "regra de três" sobre o comportamento da demanda medida. É um algoritmo síncrono, isto é, que utiliza a medição sincronizada com os pulsos fornecidos pela concessionária através do medidor de energia. O valor de Demanda Acumulada calculado é comparado com um valor médio da demanda para aquele instante, definido por um comportamento teoricamente linear da demanda, ou seja, uma reta que se inicia em  $D = 0$  para  $t = 0$ , e termina em  $D = D_{max}$  para  $t = 15$  minutos. O resultado desta comparação define se a demanda da instalação será acima da previsão, e portando exige uma ação de controle, ou abaixo dessa, não exigindo, portanto ação de controle alguma.

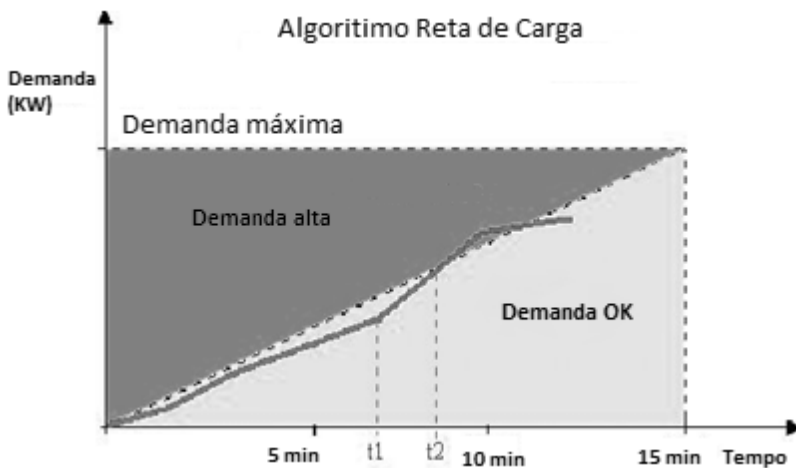


FIGURA 4 - Algoritmo reta de carga.

Fonte: Matheus, p15, 2003.

### 2.4.2.2 Método Preditivo Adaptativo

O controle preditivo adaptativo é uma variante do controle por retas de carga, porém, de complexidade maior. Permite um melhor grau de otimização do controle da demanda, com menor interferência no processo.

No método Preditivo Adaptativo é considerado para a determinação das ações de controle, não somente a Demanda Média, mas também, a derivada da curva de Demanda Medida, ou seja, a tendência à ultrapassagem é identificada tão logo ocorra.

Esse algoritmo aumenta consideravelmente a velocidade de resposta do sistema, que aplica as ações de controle tão logo surjam às tendências ao aumento ou diminuição da demanda no intervalo.

A parte preditiva utiliza medição sincronizada com a concessionária integrando os pulsos recebidos a partir do instante zero

(chegada do sincronismo) e trabalhando sempre com a projeção da demanda dentro do intervalo de integração e com o conhecimento prévio do valor da potência da carga.

A parte adaptativa se caracteriza por prioridades de atuações sobre as cargas controláveis, que se alteram automaticamente durante o período de integração em função de uma variável elétrica ou de processo (demanda média, consumo, temperatura, pressão, vazão, etc.) ou em função de uma condição operacional quaisquer configuradas pelo usuário em tempo real (Matheus Henrique, 2003).

Tomando como exemplo a Figura 5, o algoritmo preditivo adaptativo detecta uma variação da taxa de crescimento da demanda no instante  $t_1$ , e com isso consegue prever que no instante  $t_2$  ocorrerá uma ultrapassagem. Sendo assim, logo após o instante  $t_1$ , ocorrerá a ação de controle no sentido de prevenir a ultrapassagem, através da remoção de cargas da instalação.

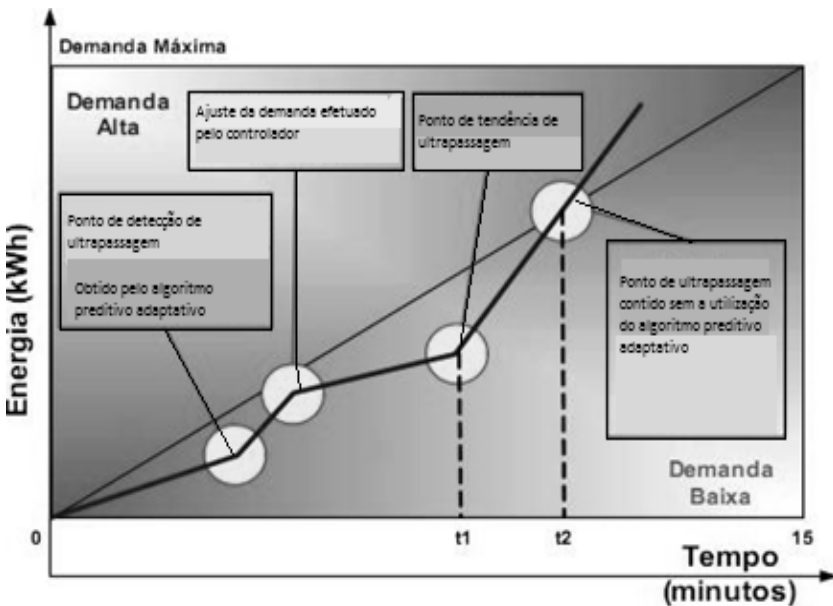


FIGURA 5 - Método preditivo adaptativo.

Fonte: Andreoli 2012.

## 2.5 Zigbee

O padrão ZigBee foi desenvolvido para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções complexas para seu controle, diminuindo assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetada para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar (eletronica.org, 2012).

O padrão ZigBee (IEEE 802.15.4) foi projetado objetivando apresentar as seguintes características:

- Consumo de potência baixo e implantação simples, com interfaces de baixo custo.
- Dois estados principais de funcionamento: "active" para transmissão e recepção e "sleep", quando não está transmitindo.
- Simplicidade de configuração e redundância de dispositivos (operação segura).
- Densidade elevada dos nós por rede. As camadas PHY e MAC permitem que as redes funcionem com grande número de dispositivos ativos. Este atributo é crítico para aplicações com sensores e redes de controle.
- Protocolo simples que permite a transferência confiável de dados com níveis apropriados de segurança.

### 2.5.1 Funcionamento

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na faixa ISM que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2.4 GHz (Global), 915 MHz (América) e 868 MHz (Europa).

O padrão oferece atualmente interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10 kbps e 115 kbps e com um alcance de transmissão normalmente entre 10 m e 100 m podendo alcançar até 16km, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais.

Quanto ao problema de alimentação dos dispositivos, os módulos de controle dotados com a tecnologia ZigBee podem ser alimentados até mesmo por baterias (pilhas) comuns, sendo que sua vida útil está relacionada em função da potência de transmissão. Nesse aspecto, o protocolo ZigBee foi projetado para suportar aplicações com o mínimo de consumo.

### 2.5.2 Estrutura da Rede Zigbee

É possível identificar dois tipos de dispositivos em uma rede ZigBee, os quais são:

*Full Function Device* (FFD) - pode funcionar em toda a topologia do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede e consequentemente ter acesso a todos os outros dispositivos. Trata-se de dispositivos de construção mais complexa.

*Reduced Function Device* (RFD) – é limitado a uma configuração com topologia em estrela, não podendo atuar como um coordenador da rede. Pode comunicar-se apenas com um coordenador de rede. São dispositivos de construção mais simples.

Em topologias com configuração estrela, conforme Figura 6, uma rede ZigBee requer pelo menos um dispositivo FFD atuando como coordenador da rede e os demais dispositivos podem ser do tipo RFD



para reduzir o custo do sistema. Para topologias ponto-a-ponto (*Peer-to-Peer*) e em árvore, todos os dispositivos devem ser FFD.

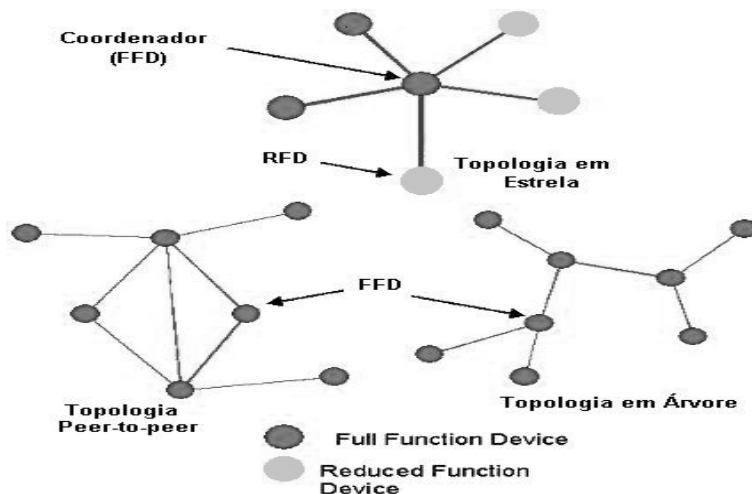


FIGURA 6 - Topologias da rede Zigbee.

Fonte: Zigbee Alliance (2012)

### 2.5.3 Segurança da Rede Zigbee

O padrão ZigBee adotou a proposta de um novo algoritmo de segurança, baseado na simplificação do algoritmo de roteamento AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*). Esta proposta foi adotada como parte da especificação IEEE 802.15.4.

A camada MAC utiliza o padrão AES (*Advanced Encryption Standard*) como seu algoritmo de criptografia, descrevendo uma variedade de rotinas de segurança. Essas rotinas têm como objetivo prover a autenticidade, a integridade e a confidencialidade dos frames da camada MAC. A camada MAC faz o processamento de segurança, mas são as camadas superiores que controlam o processo, ajustando as chaves de criptografia e determinando os níveis de segurança que deverão ser usados.

Quando a camada MAC transmite (ou recebe) um frame, verifica o destino (a fonte do frame), recupera a chave associada com esse destino (fonte), e usa essa chave para processar o frame de acordo com a rotina de segurança designada para a chave que está sendo usada. Cada chave é associada a uma única rotina de segurança e o cabeçalho do frame MAC possui um bit que especifica se a segurança para o frame está habilitada ou não (eletrônica.org, 2008).

## 2.6 Arduino

O Arduino é uma plataforma de hardware e software “*opensource*” desenvolvida para prototipagem de equipamentos eletrônicos. É baseada, na maioria das vezes, em um microcontrolador ATmega. Utiliza uma linguagem de programação padrão baseada em “*Wiring*”, essencialmente C/C++.

### 2.6.1 Hardware do Arduino

O sistema Arduino é composto por uma CPU utilizando geralmente um microcontrolador AVR de oito bits com componentes complementares para facilitar a programação e integração com outros circuitos. Um importante aspecto é a maneira padrão que os conectores são expostos, permitindo a CPU ser interligada a outros módulos de expansão conhecidos como *shields*. Os Arduinos originais utilizam chips AVR especialmente os ATmega8 Figura 8, ATmega168, ATmega328 e a ATmega1280, porém muitos outros processadores são utilizados por placas de diferentes fabricantes. Dessa forma é possível encontrar CPU com processadores de 32 bits e com capacidades diferentes de memória.

A grande maioria de placas inclui um regulador linear de 5 V e um oscilador de cristal de 16 MHz (podendo haver variantes com um ressonador cerâmico). O microcontrolador é pré-programado com um

*bootloader* que simplifica o carregamento de programas para a memória *flash*. O carregamento do programa é feito de forma serial via conexão USB. A alimentação pode ser feita via porta USB ou por fonte DC externa, via um conector tipo P4.

A maioria dos pinos de E/S dos microcontroladores estão disponíveis para uso externo. A versão Diecimila, por exemplo, disponibiliza 14 pinos digitais, além de 6 entradas analógicas (Figura 7). Estes estão disponíveis em cima da placa, através de conectores fêmeas de 0,1 polegadas (ou 0,25 centímetros).

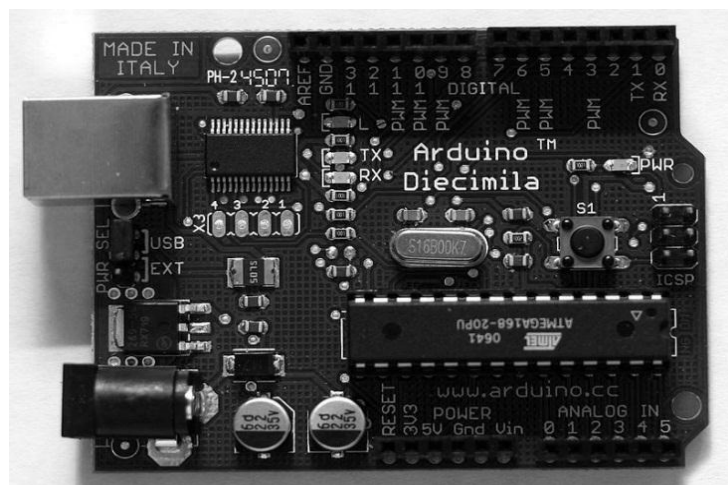


FIGURA 7 - CPU Arduino.

## 2.6.2 Software do Arduino

A IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino é uma aplicação multiplataforma escrita em Java na qual é derivada dos projetos *Processing* e *Wiring*. Inclui um editor de código, recursos de realce de sintaxe, parênteses correspondentes e endentação automática. É capaz de compilar e carregar programas para a placa via comandos específicos.

A IDE do Arduino Figura 8 usa o conjunto de ferramentas GNU e o AVR Libc para compilar os programas, para depois, com o programa avrdude, enviar os programas para o uC.

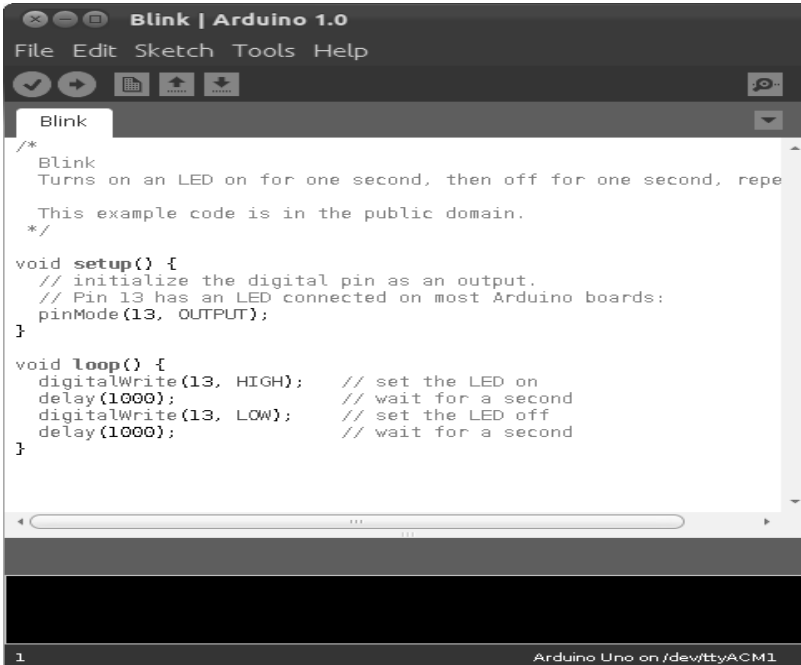


FIGURA 8 - Interface IDE do Arduino

## 2.7 Android

O Android é um sistema operacional baseado em Linux projetado para equipamentos móveis com o objetivo de ser uma plataforma flexível, aberta e de fácil migração para os fabricantes. O sistema foi desenvolvido pela Android Inc. em 2005, que foi adquirida pela Google em 2006.

Aplicações para o Android são escritas em Java e são compiladas em *bytecodes* Dalvik, executadas usando a Máquina virtual Dalvik, que

é uma máquina virtual especializada, desenvolvida para uso em dispositivos móveis, o que permite que programas sejam distribuídos em formato binário (*bytecode*) e que possam ser executados em qualquer dispositivo Android, independentemente do processador utilizado. Apesar das aplicações Android serem escritas na linguagem Java, ela não emprega uma máquina virtual Java, já que não executam *bytecodes* dessa máquina virtual.

## 2.8 APP Inventor

O APP Inventor é uma ferramenta para desenvolvimento de aplicativos para celulares que utilizam o sistema operacional Android.

Essa ferramenta foi originalmente desenvolvida pela Google, mas no momento é mantida pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Permite que qualquer pessoa familiarizada com lógica de programação possa desenvolver um aplicativo para Android.

Baseada no conceito de computação em nuvem, as aplicações feitas com o APP Inventor ficam armazenadas em servidores da Google, permitindo dessa forma, que o usuário possa acessar seus programas em qualquer plataforma com acesso a internet. Basicamente, o APP Inventor é dividido em duas sub-ferramentas: o App Inventor Designer e o App Inventor Blocks Editor.

As ferramentas tem porte para os sistemas operacionais Mac OSX X, GNU/Linux, e Windows. Os aplicativos desenvolvidos com esta ferramenta podem ser instalados em qualquer telefone utilizando Android. Essa ferramenta fornece também a opção de simulação do aplicativo na plataforma de desenvolvimento ou em um celular operando no modo de depuração.

## 2.8.1 App Inventor Designer

É nessa ferramenta que se encontram os componentes que serão utilizados na aplicação em desenvolvimento. Usando uma interface gráfica Figura 9, possibilita que o usuário selecione e arraste os objetos para criar a aplicação.

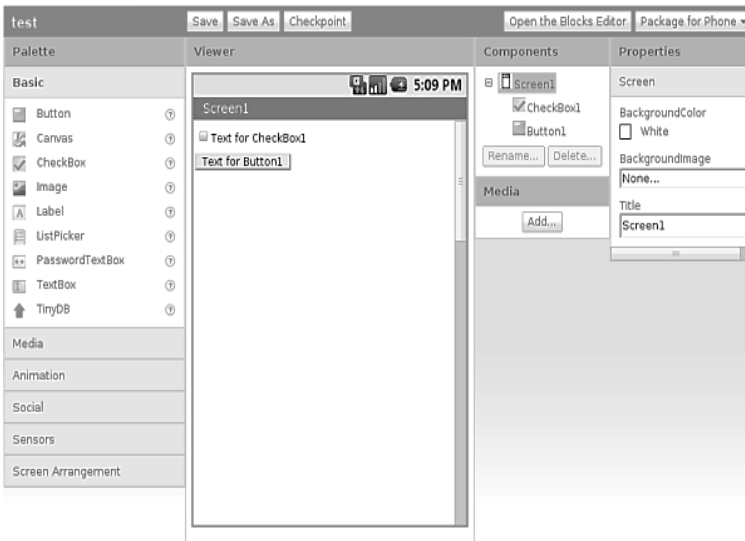


FIGURA 9 - App Inventor Designer.

Fonte: App Inventor 2012.

## 2.8.2 App Inventor Blocks Editor

Ferramenta do App Inventor que monta o programa na forma de blocos, conforme exemplo da Figura 10, que especificam como os componentes devem se comportar. O editor de blocos usa a biblioteca Open Blocks Java para criar uma linguagem de programação visual.



FIGURA 10 - App Inventor block editor.  
Fonte: App Inventor 2012.





### **3. DESENVOLVIMENTO**

Neste capítulo serão apresentados os componentes utilizados no projeto: esquemas elétricos, diagrama de blocos do firmware de controle e os diagramas de blocos do software de monitoramento para o telefone celular. Também será apresentado um diagrama geral de funcionamento do sistema.

#### **3.1 Características do Equipamento**

O proposto é o projeto de um equipamento que forneça a indicação de consumo de potência ativa instantânea, consumo acumulado e estimativa de consumo ao longo do período de trinta dias. Essas indicações serão feitas em um telefone celular.

O equipamento também deve comunicar-se com o medidor eletrônico de energia do estabelecimento utilizando a saída ótica do mesmo. Para atuar como controlador de demanda, o equipamento deve controlar as cargas da instalação remotamente via *wireless*.

O diagrama do projeto é apresentado na Figura 11 que demonstra as conexões entre os componentes do sistema.

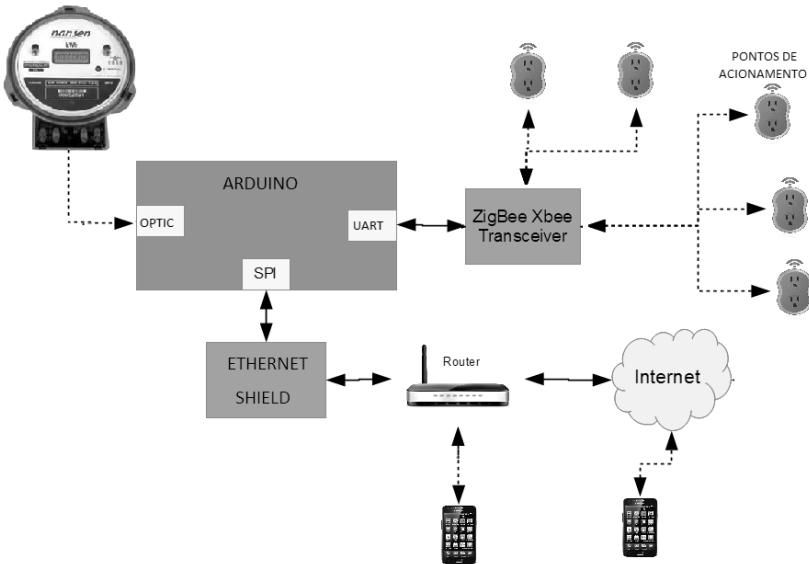


FIGURA 11 - Diagrama do projeto

### 3.2 Definição da Plataforma de Hardware.

Para o desenvolvimento deste trabalho, o hardware necessário deveria proporcionar, além do microcontrolador escolhido, comunicação serial EIA-RS232 com conexão SPI.

Devido a custos e tempo de desenvolvimento, optou-se pela plataforma Arduino, atendendo os requisitos do projeto e sendo de fácil aquisição.

Portanto, optou-se, portanto por se utilizar o modelo Arduino Duemilanove, com um microcontrolador Atmega 328. A placa de controle possui as características apresentadas na Tabela 1:

TABELA 1 - Características placa Arduino

Microcontrolador	ATmega 328
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Entradas digitais (limites)	6-20V
I/O Digital	14 (sendo 6 para saída PWM)
Entradas analógicas	6
Corrente DC por pino I/O	40 mA
Corrente DC para pino 3.3V	50 mA
Memória flash	32 kB sendo 2 kB ocupados pelo bootloader
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
ClockSpeed	16 MHz

Para a comunicação ethernet foi utilizado a ethernet *shield* Figura 12, baseada no controlador ethernet da Wiznet, W5100. As características dessa placa são descritas na tabela 2.

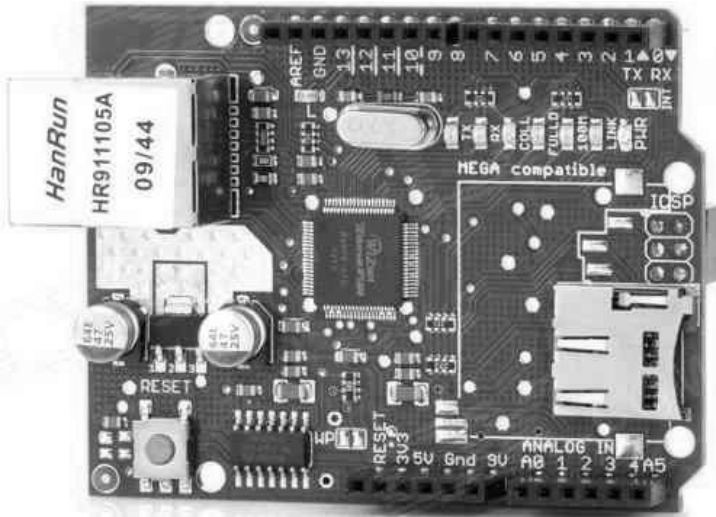


FIGURA 12 - Ethernet *shield*

TABELA 2 - Características ethernet *shield*

Controlador ethernet	Wiznet w5100 16k de buffer
Tensão de operação	5V
Velocidade de conexão	10/100mb
Conexão com Arduino	Porta SPI
Número de conexões	Até 4 socket simultâneos

A placa da figura 12, também possui um *slot* micro SD e pode trabalhar com PoE(Power Over Ethernet) com cabos de par trançado CAT5.

Para conexão entre o controlador e os pontos de acionamento e controle de cargas, utilizou-se módulos de RF da marca MaxStream.

A MaxStream, um fabricante de componentes para comunicações sem fio, criou uma linha chamada XBee. O XBee é um pequeno, mas completo, transmissor/receptor ZigBee.

Há três opções de antenas para o XBee, mostrados na figura 13:

- 1) Integrada no chip. Neste caso a energia radiada não é direcional.
- 2) Com um conector para antena externa.
- 3) Com uma antena vertical integrada (chicote). Basicamente, isto permite direcionar o feixe.

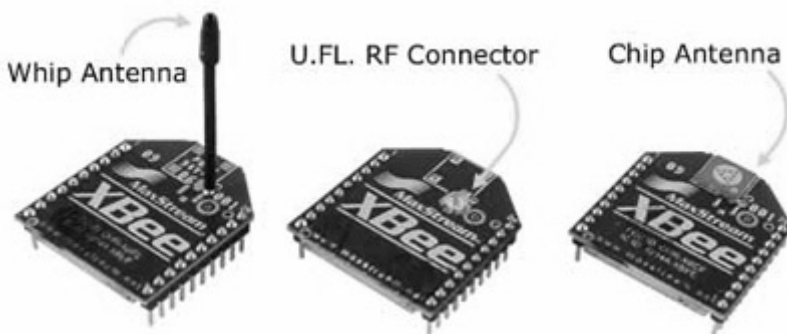


FIGURA 13 - Modelos de módulos zigbee Maxstream.

Fonte: Digi-2012.

Neste projeto foi utilizado um módulo com antena wip para o ponto de acionamento e outro com conector UFL e antena externa para o envio de comandos do controlador.

Para facilitar sua utilização, a MaxStream disponibiliza também um útil programa chamado X-CTU Figura 14 . Esse pode ser obtido gratuitamente no sitio do fabricante. A grosso modo, o X-CTU é usado para configurar todos os parâmetros do módulo XBee. Pode-se usá-lo também para realizar atualizações de firmware.

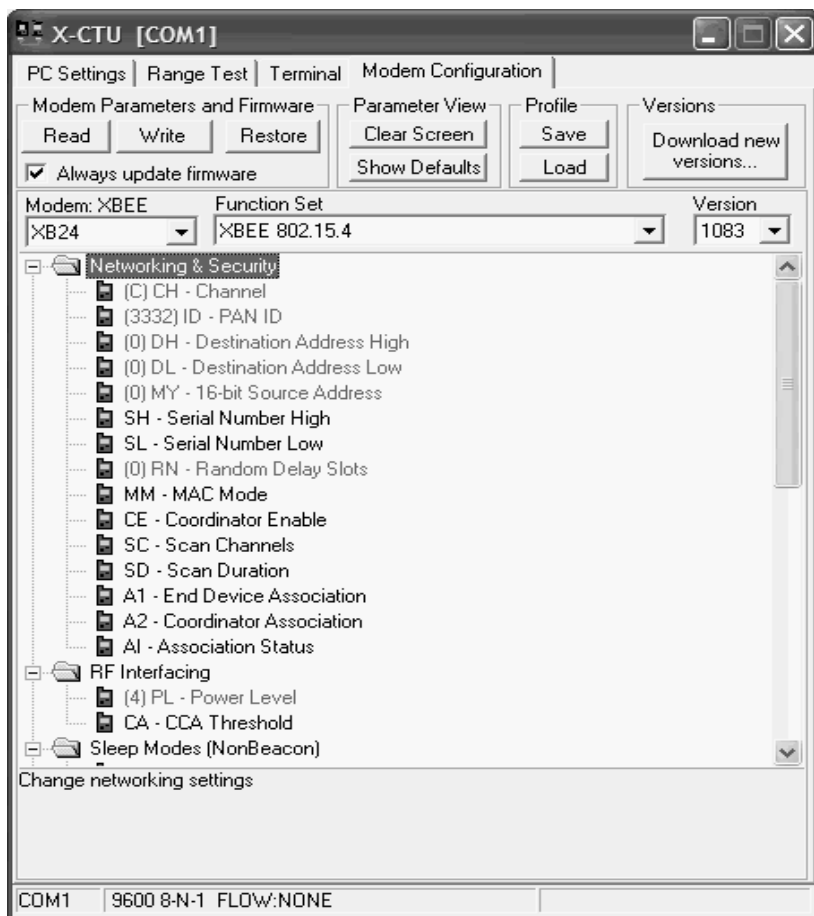


FIGURA 14 - Software de configuração dos módulos zigbee.

Fonte: Digi 2012.

### 3.3 Projeto do Firmware.

Nesta seção será apresentado de forma sucinta, num diagrama de blocos, o funcionamento do firmware de controle do equipamento.

O firmware foi basicamente dividido em três principais rotinas:

- a) Rotina de monitoração
- b) Rotina de controle de demanda.
- c) Rotina de comunicação.

Após o hardware estar configurado, é executada a rotina de monitoração Figura 15 periódica, que roda uma vez por segundo.

Nessa rotina o controlador verifica se existe comunicação com o medidor de energia, em caso positivo, é feita a contagem de pulsos enviados pelo medidor. Por padrão, o medidor envia 100 pulsos por KW/h de consumo.

Após receber os pulsos do medidor e fazer os cálculos, o controlador salva os valores de potência ativa atual, potência ativa acumulada e previsão de consumo para trinta dias.

A rotina de controle de demanda Figura 16 verifica se existe uma tendência de ultrapassagem do valor estipulado de demanda, essa verificação é feita a cada minuto.

Se houver uma tendência de ultrapassagem e o controlador estiver operando em modo automático, as cargas são controladas até que o nível de demanda retorne ao padrão. Se o controlador não estiver no modo automático, é emitido apenas um aviso para o usuário através do software no Android.

Na rotina de comunicação, o controlador monitora a cada cinco segundos a conexão com o cliente, nesse caso o software no Android.

Se houver um cliente conectado, o controlador faz a troca de informações, enviando dados e recebendo comandos.

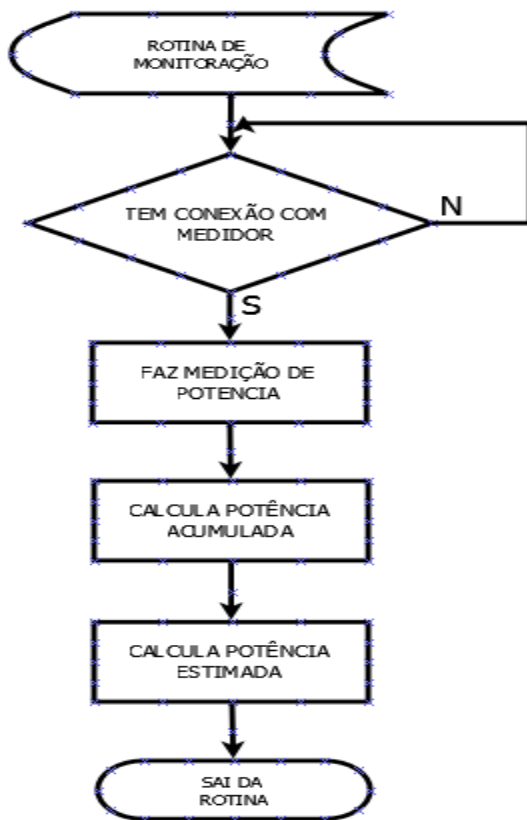


FIGURA 15 - Rotina de monitoração.



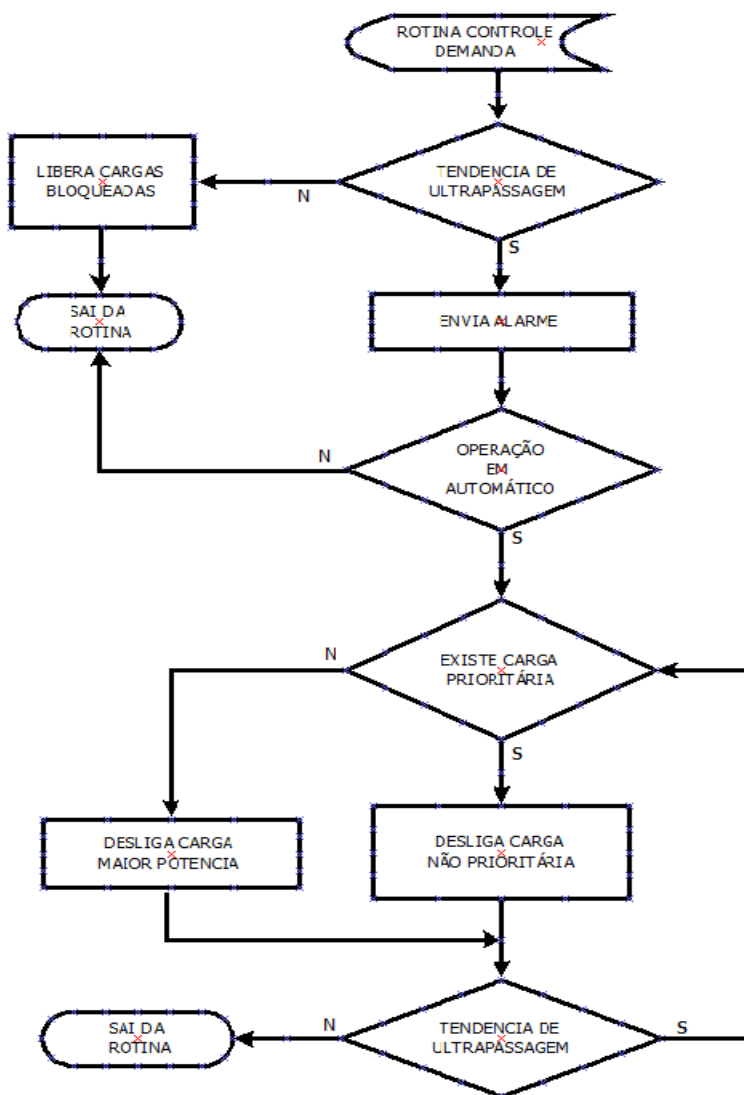


FIGURA 16 - Rotina de controle de demanda.

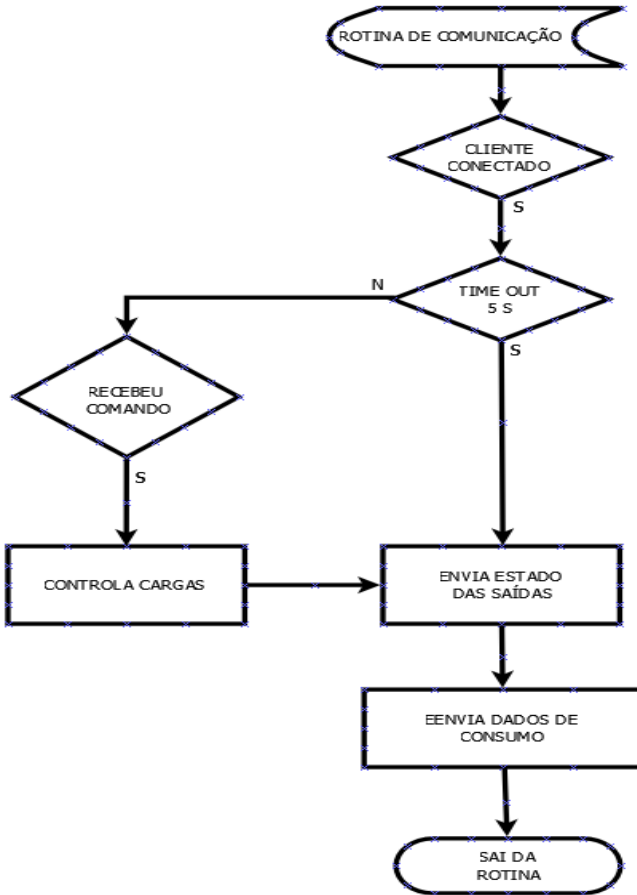


FIGURA 17 - Rotina de comunicação.

### 3.4 Projeto do Aplicativo para Android

O aplicativo para Android tem a função de enviar os comandos de controle das cargas e receber os dados do consumo de energia.

Existem três mostradores no aplicativo: consumo atual, consumo acumulado e consumo previsto. Esses mostradores são atualizados a cada cinco segundos.

Além dos mostradores, o aplicativo disponibiliza quatro *check box* que informam e controlam o status das saídas .

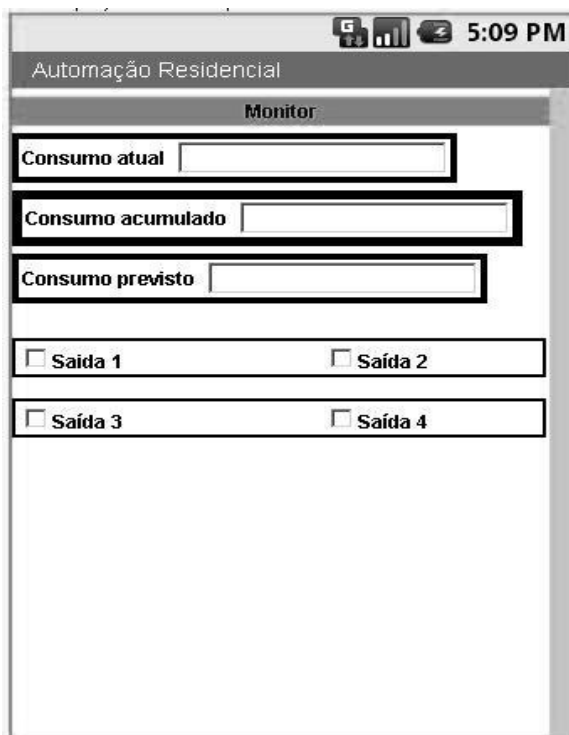


FIGURA 18 - Aplicativo para Android.

### 3.5 Desenvolvimento do Hardware de Acionamento

O controlador de carga é constituído basicamente por quatro blocos (placas) que foram adquiridas montadas:

- a) CPU Arduino.
- b) Ethernet *shield*.
- c) Zigbee *shield* com módulo Zigbee.
- d) Fonte de alimentação 5 VCC.

A comunicação entre o Arduino e placa ethernet se dá via SPI sendo a o Arduino atuando como mestre.

Quando um comando é enviado pelo celular, a placa ethernet *shield* entrega os dados via SPI. Esses dados são tratados pela biblioteca Ethernet do Arduino e decodificados pelo programa.

Existem apenas dois comandos enviados pelo celular, o que liga e o que desliga uma saída específica:

```
{"ip" : "192.168.10.23", "devices" : [{ "type" : "io", "name" : "saída 1", "out" : "1"}]}
```

Onde o endereço *IP* é o endereço do controlador, *type* é o tipo de saída, que no projeto são as saídas digitais, *nome* indica qual saída será controlada e *out* indica se será ligada (1) ou desligada (0).

O controlador responderá o status da saída comandada:

```
{"status" : "1", "out" : "saída 1"}/}
```

Logo após os valores de potencia atual, acumulada e prevista serem enviados ao celular. Se não houver nenhum recebimento de comando durante um tempo de cinco segundos, o controlador reenviará os dados de potência.

```
(",{ \"type\" : \"wattmeter\", \"name\" : \"Potencia instantanea\",  
\"out\" : \" valor da potencia\"});
```

A comunicação entre o Arduino e o módulo zigbee se dá através de uma interface serial, com comandos simples sem confirmação.

```
("{\"network_MAC\" : \"0x01DF\", \"out\" : \"I\"});
```

Onde o *network\_MAC* é o endereço individual de cada módulo na rede e *out* é a saída I/O que o módulo deve trocar de estado.

Cada vez que um módulo é acionado, a CPU verifica a diferença de consumo na rede em relação à leitura anterior, e salva esta diferença sendo o valor de consumo da saída acionada. Esse valor é utilizado somente no modo automático.

### 3.5.1 Módulo de Acionamento

O módulo de controle de cargas, mostrado na Figura 20, é responsável pelo acionamento das cargas ligadas à rede elétrica. Este módulo é composto por três blocos:

- a) Fonte 220 VAC/5V e 3V, mostrada na Figura 19.
- b) Módulo Zigbee.
- c) Relé.

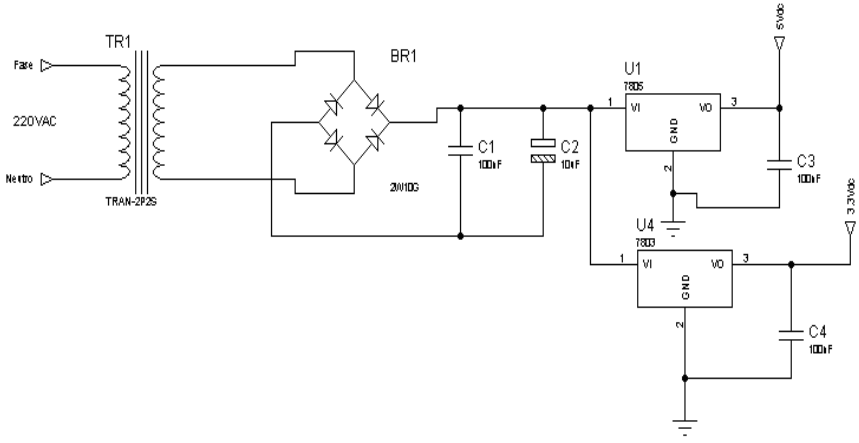


FIGURA 19 - Fonte de alimentação do módulo de controle de carga.

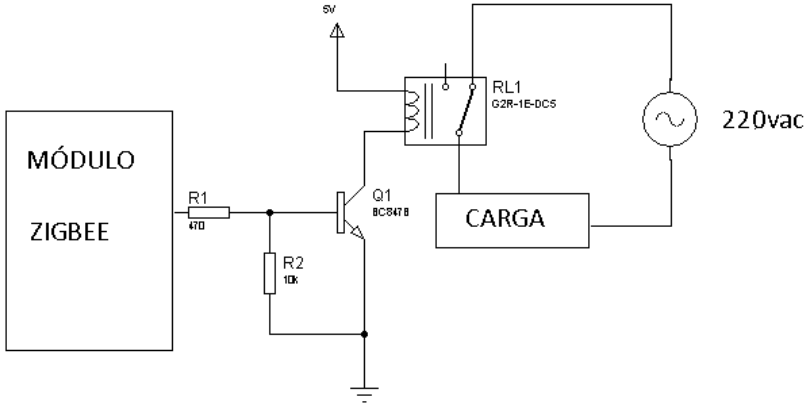


FIGURA 20 - Esquema módulo de acionamento.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados em laboratório, bem como os equipamentos utilizados para os mesmos.

Para simular um medidor eletrônico de energia, foi utilizado um kit de desenvolvimento de medidor monofásico da Microchip mostrado na Figura 21. Esse kit é baseado no CI MCP3905, responsável pela medição e cálculo de energia. Esta placa possui uma saída isolada opticamente para transmitir os pulsos referentes ao valor de energia medida, seguindo o padrão de 100 pulsos por kW/h.

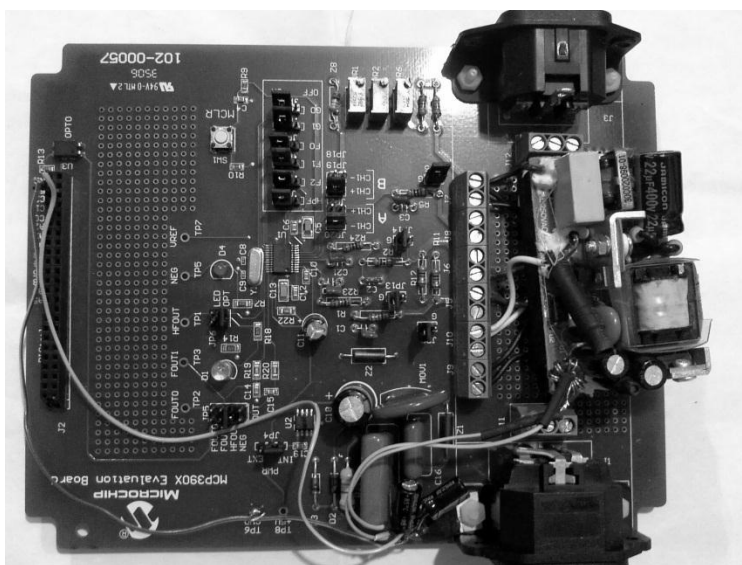


FIGURA 21 - Kit de desenvolvimento de medidor eletrônico.

Fonte: Microchip 2012.

Para a simulação de carga foi utilizado um banco de carga com capacidade de até 2000 W. O banco de carga mostrado na Figura 22 permite aplicar até oito degraus de carga de 250 W cada.



FIGURA 22 - Banco de carga para teste.

Para aferir os valores informados pelo controlador, foi utilizado um analisador de potência, um Fluke 41b *power analyzer* mostrado na Figura 23, o qual estava devidamente calibrado.





FIGURA 23 - Analisador de potência Fluke 41b

Para os testes o controlador foi programado com os seguintes parâmetros da Tabela 3.

TABELA 3 - Parâmetros programados para ensaio.

Número de pontos de acionamento	1
Demanda máxima programada	500 W
Tipo do ponto de acionamento	Carga não prioritária
Modo de operação	Automático

A Figura 24 demonstra o diagrama de conexão dos componentes para a realização dos testes.

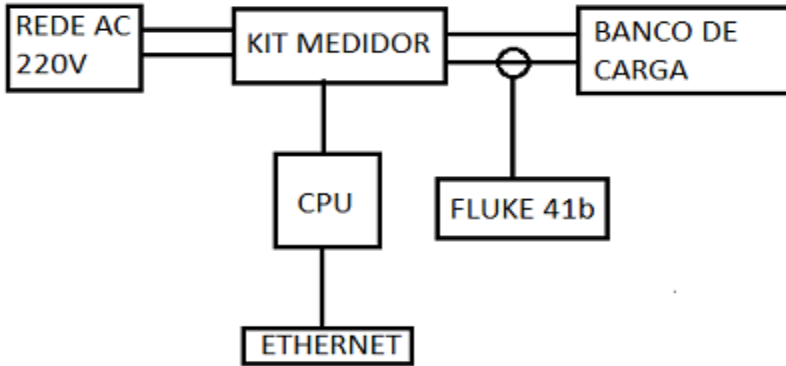


FIGURA 24 - Conexão para teste.

Na Figura 25 é apresentado o conjunto formado pela placa Aduino conectada à placa internet *shield* e à placa zigbee *shield*. Na mesma figura pode-se observar o ponto de acionamento montado, formado pelo módulo zigbee e a placa de relé.

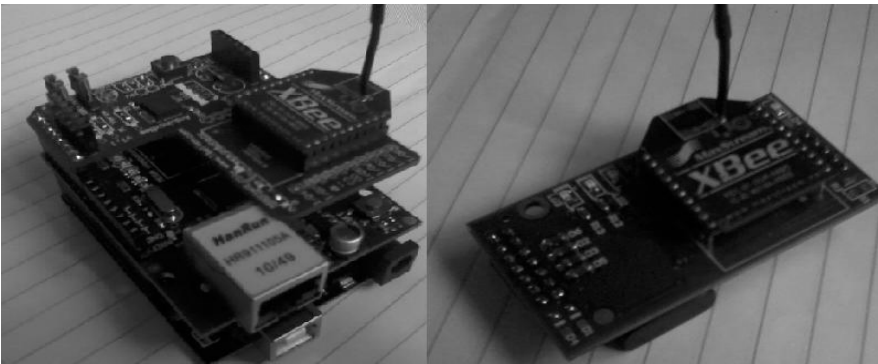


FIGURA 25 - Placa de controle e ponto de acionamento

O objetivo do ensaio foi o de verificar o funcionamento do sistema que deveria atuar, desconectando a carga, ao detectar a ultrapassagem da demanda referente ao valor programado que foi de 500W.

Durante o teste foram aplicados degraus de potência no valor de 250 W. Para verificar o correto funcionamento do algoritmo de controle de carga, foi programado o envio de dados de aquisição e controle via porta serial. Esses dados foram transferidos para o programa Excel para possibilitar a elaboração de gráficos.

### 5.1 Teste de Controle de Carga

Na Figura 26, pode-se observar dois pontos de detecção de ultrapassagem, aos 7 minutos e aos 12 minutos. Em ambos os casos, o controle atuou sobre a carga, mantendo o valor de 500 W.

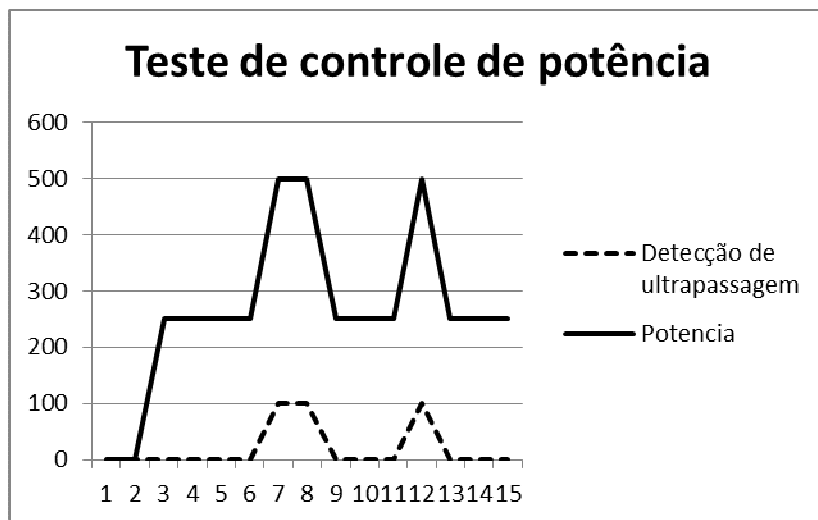


FIGURA 26 – Gráfico de controle

Na Figura 27 é possível observar o gráfico da potência controlada e potência solicitada em 560 segundos. Nesse período foram aplicados degraus de potência no valor de 250 W chegando até 750 W. Pode-se observar que houve uma atuação no momento de detecção de ultrapassagem do valor programado, mantendo dessa forma a potência controlada em 500 W.

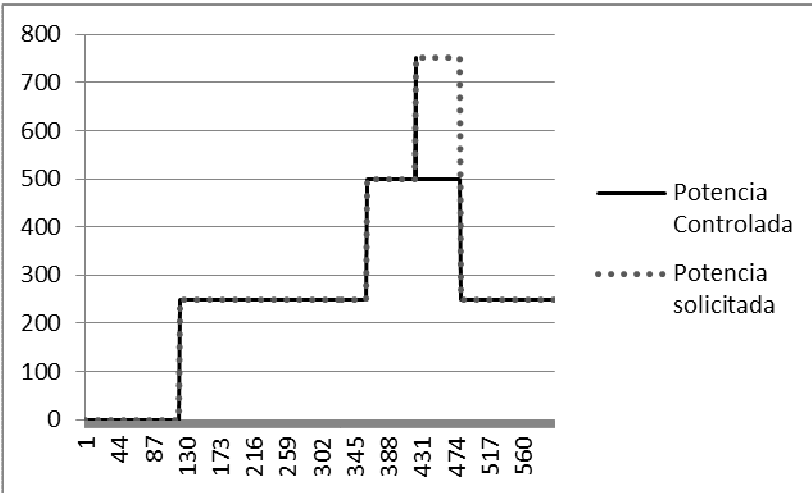


FIGURA 27 – Gráfico de carga controlada e carga solicitada.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre as modalidades tarifárias atualmente vigentes no Brasil e classificação de consumidores. Na sequência, foi feito um estudo sobre controladores de demanda e medidores eletrônicos de consumo e energia elétrica.

Tendo a base teórica, foram iniciados estudos para a escolha da plataforma de hardware a ser utilizada no trabalho. Inicialmente, foi considerada a utilização de um processador de 32 bits e maior capacidade de memória. Nesse caso, os dados de aquisição e controle não seriam enviados a um aplicativo rodando sobre o sistema operacional Android, mas ficariam no próprio controlador que serviria como um web server. Essa ideia foi abandonada devido ao custo e ao tempo de aprendizagem necessária.

O uso da plataforma Arduino foi acertado, devido a fácil aquisição, pois existem muitos fornecedores locais com preços compatíveis com o projeto.

Além da variável custo, na escolha do Arduino, também foi levado em conta e da ferramenta APP Inventor. Essas ferramentas foram escolhidas para prototipagem e desenvolvimento rápido de produtos eletrônicos e aplicativos embarcados.

Concluindo, os objetivos específicos deste trabalho foram alcançados com êxito, conforme proposto inicialmente.

Com o projeto e protótipo do controlador de demanda pronto, foi possível testar sua integração com um medidor de energia e a comunicação com um dispositivo móvel com sistema operacional Android.

Também foi possível projetar e testar um ponto de acionamento de fácil instalação devido a escolha de tecnologia de comunicação, já que para a instalação desse dispositivo não há a necessidade do local

estar preparado para receber essa automação. Entende-se que a comunicação sem fio é a solução ideal para estes casos.

Na tabela 4, é possível verificar o custo do equipamento e um ponto de controle. Nesse custo, não foram considerados os componentes discretos (resistores, capacitores, conectores) e nem mesmo, a placa de circuito impresso do ponto de acesso, uma vez que a mesma não foi fabricada.

Estima-se que o custo completo com gabinete não alcance R\$ 350,00, sendo que cada ponto de acesso ficará em torno de R\$ 50,00 ou seja, um custo acessível se comparado com os controladores de demanda voltados para grandes consumidores.

TABELA 4 - Custo controlador do e um ponto de acesso

<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Preço total</b>
Arduino	01	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Ethernet Shield	01	R\$ 60,00	R\$ 60,00
ZigbeeShield	01	R\$ 39,00	R\$ 39,00
Módulo Zigbee	01	R\$ 59,00	R\$ 59,00
Rele Metaltex JXC1NA4	01	R\$ 20,00	R\$ 20,00
<b>TOTAL</b>			R\$ 258,00

## 6.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Ficam as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- 1) Implementar a comunicação WiFi entre o controlador e o roteador de rede local.
- 2) Testar outros módulos de menor custo para comunicação sem entre o controlador e os pontos de acionamento.
- 3) Melhorar a interface gráfica do aplicativo que roda no Android.
- 4) Desenvolver uma *Shield* que seja capaz de medir tensão da rede e corrente de consumo, não necessitando que o sistema tenha comunicação com o medidor de energia.





## REFERÊNCIAS

Aparecido, Paulino. Clovis **Estudo de tecnologias aplicáveis a automação da medição de Energia Elétrica Residencial Visando a Minimização de Perdas**. 2006. 101 f.. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

Matheus, Henrique. **Controladores de Demanda**. 2003. 32f. (Trabalho de conclusão de curso) - Universidade Federal do MatoGrosso, Cuiaba MT.

Andreoli. André, Cagnon. JoséA, Fontes, Ivo, Malara. MichelC, Franco. Paul. **Sistema de Controle de Demanda Aplicado a Consumidores de Baixo Porte**. São Paulo: UNESP, 2008. 6 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução ANEEL n° 456**. Brasília, 29 de novembro de 2000.

Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução ANEEL n° 414**. Brasília. 09 de setembro de 2010.

Zigbee Alliance. **Zigbee** . Disponível em : <http://www.zigbee.org>. Acesso em 10 de novembro de 2012.

Nansen SA. **Produtos Medidores**. Disponível em: <http://www.nansen.com.br> Acesso em: 01 de outubro de 2012

Digi International. **Zigbee wireless modems and peripherals**. **Disponível em:** <http://www.digi.com/products/wireless-modems-peripherals/zigbee/> . Acesso em 01 de outubro de 2012.