

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO
2012.1

Análise dos Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica em Plantas Industriais

Trabalho de Graduação

Autora: Sofia Galvão Lima (sgl2@cin.ufpe.br)
Orientador: Prof. PhD. Sérgio Vanderlei Cavalcante (svc@cin.ufpe.br)

Recife, 05 de Julho de 2012

Análise dos Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica em Plantas Industriais

Trabalho de Graduação

Trabalho de Graduação apresentado no
Centro de Informática da Universidade
Federal de Pernambuco, por Sofia Galvão
Lima, orientada pelo Prof. PhD. Sérgio
Vanderlei Cavalcante, como meio de obter
o grau em Engenharia da Computação.

Análise dos Sistemas de Medição do Consumo de Energia Elétrica em Plantas Industriais

Sofia Galvão Lima

Orientador: Prof. PhD. Sérgio Vanderlei Cavalcante – UFPE

Avaliadora: Profa. PhD. Ana Carolina Salgado – UFPE

Para todos aqueles – e não são poucos – que de alguma maneira contribuíram para a minha chegada até aqui. Especialmente para a minha mãe e irmãos, com os meus sinceros agradecimentos por todo o apoio. E para Kássio, cuja presença foi essencial para a finalização deste trabalho.

RESUMO

A energia elétrica é de fundamental importância para a realização de diversas atividades, ainda mais nos dias de hoje, em que a maior parte dos sistemas é informatizada. No setor industrial, não é diferente, porém com uma particularidade: a falta ou o uso ineficiente da energia elétrica interfere diretamente no preço dos produtos e nas margens de lucro.

Por outro lado, o Governo e as concessionárias trabalham para melhorar a rede elétrica de maneira que as faltas e as perdas sejam diminuídas, bem como a necessidade por investimentos em geração e aumento da infraestrutura sejam evitados.

Porém, para atingir o uso eficiente dos recursos energéticos, faz-se necessário monitorar o consumo. Por isso, este trabalho tem como objetivo discutir questões relacionadas ao uso da energia elétrica com foco no setor industrial. Primeiro, são apresentadas as soluções que estão sendo usadas para resolver o problema da ineficiência do consumo e, depois, é formalizada uma prova de conceito baseada na pesquisa realizada.

Índice

1.	Introdução	8
2.	Background.....	9
2.1.	Smart grid.....	9
2.1.1.	Infraestrutura de medição avançada	10
2.1.2.	Automação da distribuição	10
2.1.3.	Fontes de energia distribuídas	10
2.2.	Smart meter	11
2.3.	Eficiência energética no setor produtivo	14
2.4.	Fundamentos da manutenção	16
2.4.1.	Manutenção corretiva.....	17
2.4.2.	Manutenção preventiva.....	17
2.4.3.	Manutenção preditiva.....	17
2.5.	Fator de potência	18
2.6.	Produtividade.....	20
3.	Problema	22
4.	Soluções existentes	26
4.1.	Principais padrões	26
4.1.1.	ANSI C12	27
4.1.2.	IEC 62056.....	27
4.1.3.	Outros.....	27
4.2.	Soluções de medição.....	28
4.2.1.	Medição de corrente	28
4.2.2.	Cálculo das grandezas	30
4.3.	Soluções de comunicação	33
4.3.1.	Power Line Communications.....	33
4.3.2.	Wi-Fi	34
4.3.3.	ZigBee	35
4.3.4.	Coleta de energia do ambiente.....	36
4.4.	Soluções encontradas no mercado	40
4.4.1.	OptoEMU.....	40
4.4.2.	PowerMonitor W250.....	41
4.4.3.	EPM 9900	42

4.4.4.	SETRON PAC4200.....	42
4.4.5.	MEDE 330	43
4.4.6.	Tabela comparativa	44
5.	Prova de conceito.....	45
6.	Conclusões e trabalhos futuros.....	51
7.	Referências	52
8.	Apêndice A – Código-fonte do firmware.....	56

1. Introdução

A energia elétrica é essencial para a maioria das atividades desempenhadas pela sociedade nos dias de hoje. Por isso, falhas ou perdas nos sistemas de geração, transmissão ou distribuição tornam-se cada vez mais críticas. Essa situação piora quando consideramos o setor industrial, que, em geral, é altamente dependente da energia elétrica para produzir. Paradas na produção e um consumo ineficiente dos recursos energéticos impactam diretamente no preço dos produtos e nas margens de lucro.

Para resolver os problemas de eficiência e confiabilidade em todas as etapas da produção de energia elétrica, foi desenvolvido o conceito de *smart grid*. Em um *smart grid*, a conectividade, a automação e a coordenação entre os fornecedores, os consumidores e as redes aumenta significativamente, seja em tarefas de transmissão a longas distâncias ou mesmo de distribuição local. Com o *smart grid*, será possível para os consumidores vender a energia excedente, por exemplo.

Para tornar o *smart grid* uma realidade, o primeiro passo é a existência de um sistema eficiente de medição do consumo de energia elétrica, que ao mesmo tempo seja bidirecional e de tempo real. Assim, surgiram os *smart meters*, medidores digitais que armazenam dados de consumo, permitem a leitura remota desses dados e implementam comunicação em duas vias entre fornecedores e consumidores.

Porém é importante comentar que, ao contrário do setor residencial, algumas informações são cruciais para o controle eficiente do consumo de energia elétrica no caso industrial. Por exemplo, no Brasil, os clientes de mais alto consumo possuem uma tarifa diferenciada nos horários de pico, o que ainda não acontece com as residências. Ao mesmo tempo, para esse tipo de cliente, interessa saber qual organização da linha de produção usa a energia de maneira mais eficiente, bem como saber se vale a pena ou não usar um gerador próprio nos horários mais caros.

Dentro do contexto anteriormente apresentado, este trabalho traz, no Capítulo 2, alguns conceitos importantes como: uma definição de *smart grid*, uma visão geral sobre *smart metering*, uma análise dos fatores determinantes para a eficiência energética com foco no setor industrial, a definição dos fundamentos da manutenção, a definição de fator de potência e a definição de produtividade com foco na indústria. O Capítulo 3, por sua vez, define melhor o problema que este trabalho propõe resolver, com base nos conceitos definidos no Capítulo 2. Já o Capítulo 4 traz uma análise de algumas das soluções existentes: padrões, soluções de medição e soluções de comunicação, finalizando com a apresentação de cinco soluções de mercado e uma tabela comparativa. Por fim, no Capítulo 5, é apresentada a prova de conceito que corrobora as conclusões feitas a partir dos trabalhos de pesquisa que deram origem à realização deste relatório de conclusão de curso.

2. Background

2.1. Smart grid

A rede elétrica está cada vez mais próxima de trabalhar no seu limite, basicamente, por dois fatores. Primeiro, o consumo está crescendo. De acordo com uma pesquisa realizada pela Litos Strategic Communication [1] para o Departamento de Energia dos Estados Unidos, desde 1982, a demanda por energia elétrica tem crescido quase 25% a mais, por ano, do que o crescimento da própria infraestrutura de transmissão [2]. Depois, apesar das melhorias, desde que foi concebida, a rede elétrica nunca passou por uma atualização de fato. Inclusive, segundo a mesma fonte, o investimento do setor elétrico em pesquisa e desenvolvimento está entre os menores, se comparado aos demais setores industriais [2]. A grande questão é que atualizar a rede elétrica atual é uma tarefa complexa, similar ao trabalho de se construir um sistema interestadual de rodovias ou se desenvolver a internet, por exemplo, e projetos como esses, considerados revolucionários, não surgem de uma vez só, mas evoluem aos poucos até que se estabilizem.

A literatura refere-se a essa nova rede elétrica como *smart grid*, termo que designa um outro jeito de pensar a rede, não mais como uma mera distribuidora de energia elétrica, mas como um sistema que entrega melhores serviços, pois baseia-se no conhecimento gerado a partir das informações que trafegam nessa rede. Assim, o *smart grid* possibilita uma distribuição mais eficiente e confiável da energia elétrica, além de trazer uma série de benefícios, tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias. Entre as características inerentes às redes elétricas inteligentes, pode-se identificar [3]:

- Possibilidade de participação ativa dos consumidores;
- Diversificação da geração e do armazenamento de energia, pois formas alternativas poderão ser facilmente incorporadas;
- Criação de novos produtos e serviços, pois as ineficiências do sistema serão mais facilmente identificadas, o que permite o aparecimento de novas oportunidades de negócio;
- Otimização do uso de ativos e criação de programas mais eficientes de manutenção da rede, o que resultará em menos falhas nos equipamentos;
- Antecipação e recuperação automática de falhas físicas ou originadas por ataques cibernéticos em componentes ou partes da rede.

Com a finalidade de implementar as tecnologias necessárias para alcançar as características anteriormente citadas, foi definido pelo National Energy Technology Laboratory [4] um plano de desenvolvimento para o *smart grid*. Com base nos seguintes valores: confiabilidade, economia, eficiência, ambiente, segurança e estabilidade, foram criados os conceitos de [3]:

- Infraestrutura de Medição Avançada (AMI);
- Sistemas para o Consumidor (CS);
- Resposta à Demanda (DR);
- Automação da Distribuição (DA);
- Aplicações para Melhorias na Transmissão (TA);
- Sistemas de Otimização de Ativos (AO);

- Fontes de Energia Distribuídas (DER);
- Integração da Informação e das Comunicações (ICT).

2.1.1. Infraestrutura de medição avançada

Para que a infraestrutura de medição avançada seja uma realidade, faz-se necessária a instalação de medidores digitais – ou *smart meters* – em todos os pontos de consumo de energia elétrica dentro da rede inteligente. Esses medidores precisam implementar uma comunicação em duas vias, bem como permitir o controle remoto de suas funcionalidades. Além de tudo, é necessário que os medidores em questão sejam capazes de armazenar dados de consumo, monitorar tensão e corrente e fornecer dados em tempo real [3].

Diferentemente dos tradicionais, esses novos medidores proverão à rede uma grande quantidade de informação necessária para atingir uma maior confiabilidade, bem como gerenciar melhor a distribuição de energia, diminuindo as perdas nesse processo. Mas, provavelmente, a maior mudança que a instalação dessa infraestrutura de medição poderá trazer será uma equalização do consumo, uma vez que os equipamentos poderão responder automaticamente à demanda [3]. Em termos práticos, isso significa, por exemplo, que uma máquina de lavar roupas poderá pausar o seu processo de lavagem durante o horário de pico, momento do dia em que o consumo é maior e, portanto, a rede elétrica encontra-se sobrecarregada.

Por fim, essa distribuição do consumo ao longo do dia evita os picos, horários em que a rede é mais demandada, e é de interesse, principalmente para as concessionárias, pois significa menos investimentos na infraestrutura da rede elétrica já existente [3].

2.1.2. Automação da distribuição

A automação da distribuição diz respeito ao monitoramento e controle da rede. Já existem dispositivos capazes de monitorar a corrente e a tensão, comunicar-se uns com os outros, e automaticamente reconfigurar o sistema, a fim de recuperá-lo de alguma falha ou mesmo para atingir outros objetivos. Essa capacidade de rapidamente reconfigurar uma rede interconectada é um componente-chave dentro do *smart grid*, entretanto também são necessários componentes de distribuição com capacidade suficiente de transferência, bem como sistemas de proteção para isolar as falhas em casos de recuperação [3].

Assim, fica claro que uma rede inteligente não apenas conecta subestações a um custo mais baixo, mas representa um sistema interconectado com grande capacidade de reconfiguração. Sistemas de distribuição tradicionais usam coordenação por tempo de corrente para proteger seus dispositivos, assumindo que dispositivos mais rápidos estão mais distantes da subestação. Porém, num *smart grid*, essa premissa é problemática, já que a rede será continuamente reconfigurada. Nesse caso, a topologia do sistema e o sistema de proteção deverão ser projetados em conjunto para garantir coordenação mesmo em configurações diferentes [3].

2.1.3. Fontes de energia distribuídas

O conceito de fontes de energia distribuídas está relacionado à presença de pequenas fontes de geração ou armazenamento conectadas ao sistema de distribuição. O *smart grid* representa um grande potencial de uso de fontes distribuídas e, nesse caso, o sistema de distribuição passa a funcionar como um pequeno sistema de transmissão. Por isso, requisitos específicos

do projeto de sistemas de transmissão devem ser considerados [3]. Dentro desse contexto, aparece o exemplo da Dinamarca que, ao longo de duas décadas, substituiu as grandes termoeletricas de geração combinada de aquecimento e energia, por unidades menores distribuídas por todo o território. Assim, pôde incorporar também o uso da energia solar e usinas de geração de energia eólica [2], como mostra a Figura 1.

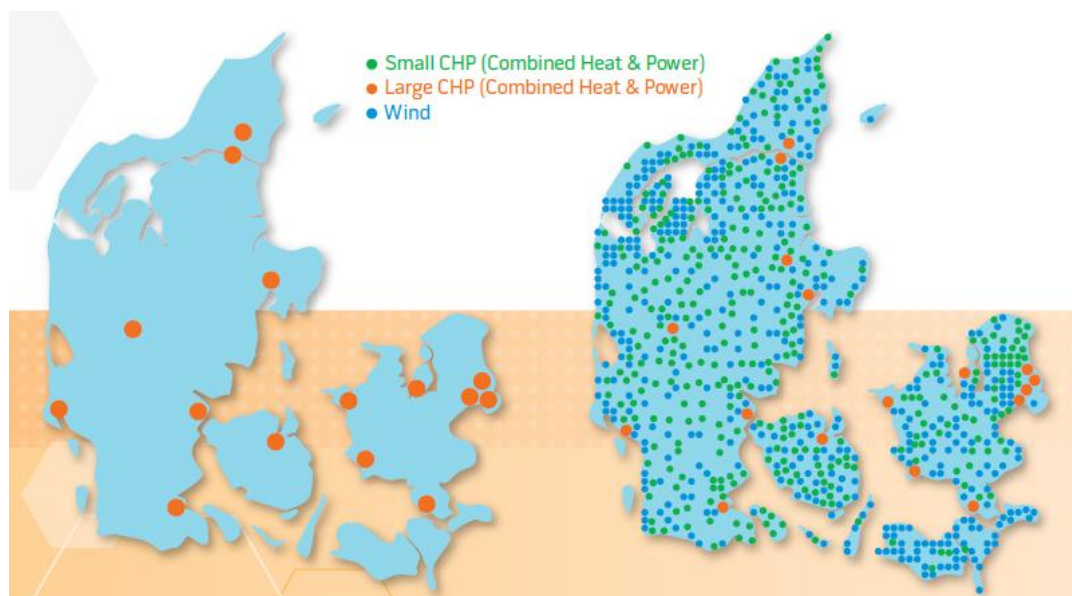


Figura 1 Progresso da Dinamarca ao longo de duas décadas.

2.2. Smart meter

Para implantar o conceito de infraestrutura de medição avançada, no qual está inserido o conceito de leitura remota de medição (AMR) – geralmente, são esses os primeiros conceitos de *smart grid* a serem implantados, por apresentarem menor complexidade – faz-se necessária a implantação de medidores especiais, capazes de enviar, em tempo real, os dados de medição das unidades consumidoras. Esses medidores digitais implementam uma comunicação com as concessionárias, permitindo a leitura remota das informações de consumo, mas também podem receber comandos de corte, caso o consumidor esteja inadimplente, por exemplo. Medidores nesses moldes são referenciados na literatura como *smart meters*.

As pesquisas realizadas dentro do contexto deste trabalho mostram que existe uma grande variedade de *smart meters* no mercado, fato que leva à conclusão de que ainda não há uma solução *one-size-fits-all* quando o assunto é *smart metering*. Algumas abordagens utilizam um resistor *shunt* para realizar as medições, enquanto outras optam pela técnica do transformador de corrente – existem ainda outras opções como, por exemplo, o uso de sensores de efeito *Hall* e abordagens híbridas. Com relação à fase, os medidores também podem ser classificados em duas categorias: os monofásicos são tipicamente utilizados em aplicações residenciais e dominam o mercado em volume de unidades vendidas, já os trifásicos são mais utilizados em aplicações comerciais ou industriais e, portanto, apresentam um custo mais elevado e maiores margens de lucro [5].

O maior desafio para os fabricantes de *smart meters* é, no entanto, acompanhar as diferenças entre os padrões adotados pelas agências regulatórias de cada região, bem como observar as funcionalidades e os serviços demandados pelos diferentes mercados. Nos Estados Unidos, por exemplo, o padrão de *smart meter* adotado define a frequência de leitura das medições e de transmissão dos dados. Como as comunicações não são suficientemente confiáveis, a regulamentação também exige que sejam armazenadas duas ou mais transmissões de dados para garantir os requisitos mínimos necessários ao cálculo do valor da conta de energia. Todas essas exigências, naturalmente, aumentam a quantidade de memória requerida, o que leva à conclusão de que as pressões regulatórias impactam diretamente no projeto do circuito dos *smart meters* [6].

No Brasil, a medição eletrônica já é utilizada em grandes unidades consumidoras (das classes A1, A2 e A3), subestações e pontos de intercâmbio de energia. Também é obrigatório o uso desses medidores para os integrantes da Câmara Comercializadora de Energia Elétrica (CCEE), bem como para os que realizam comercialização de energia no mercado livre. Já a medição eletrônica para unidades consumidoras da classe B ainda aguarda a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Hoje, os modelos básicos de medidores eletrônicos já apresentam preços inferiores aos medidores tradicionais eletromecânicos, o que tem motivado as concessionárias a iniciarem a instalação desses novos medidores – que, por exigência da Aneel, devem ser certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) – antes mesmo da regulamentação [7]. Apesar disso, os medidores eletrônicos estão presentes em apenas 7,4% das unidades consumidoras brasileiras [8].

Outra funcionalidade que pode ser implementada pelos *smart meters* está relacionada à prevenção de adulterações. Essa capacidade é especialmente importante para mercados emergentes em que o furto de energia representa uma grande porcentagem de toda a energia consumida, como é o caso do Brasil [6]. De acordo com a Aneel, em 2007, o furto de energia no Brasil representava 15% do consumo total, o que, na época, significava um prejuízo de R\$ 5 bilhões por ano, e o Rio de Janeiro era o estado com os maiores índices de fraude [9]. Assim, a partir de 2009, concessionárias como a Light e a Ampla, do Rio de Janeiro, passaram a instalar medidores eletrônicos com protocolos proprietários em consumidores de baixa tensão e constataram uma redução desses índices no estado [7].

Apesar das iniciativas isoladas, a falta de um padrão nacional de comunicação para a medição eletrônica caracteriza a maior barreira para a implementação de um *smart grid* de fato. No entanto, a Aneel ainda está focada em discutir o modelo de medidor eletrônico a ser adotado no Brasil [7]. Segundo um documento oficial da Aneel, publicado em Janeiro de 2011, o modelo de *smart meter* a ser definido será instalado primeiro nos consumidores residenciais não enquadrados como baixa renda (da classe B1) e industriais e comerciais de pequeno porte (da classe B3) 18 meses após a publicação da resolução [8]. Ou seja, enquanto a iniciativa privada já alcança avanços em termos práticos – ainda assim atrasados com relação a outros países – o setor público discute questões regulatórias, caracterizando uma grande defasagem entre o que é feito e o que é regulamentado, e barrando os avanços que poderiam ser alcançados, caso teoria e prática caminhassem juntos.

Em 2009, a agência instaurou a Consulta Pública CP 015/2009, a fim de coletar subsídios para a formulação do regulamento de implantação de medidores eletrônicos em unidades consumidoras de baixa tensão – o intuito é envolver a sociedade na discussão. Notadamente, a Consulta Pública representa um importante passo para o entendimento de conceitos e aplicações, bem como para a definição do papel da medição eletrônica dentro do contexto do *smart grid*. Entretanto, essa discussão nem sequer aborda questões relacionadas à infraestrutura de tecnologia da informação e comunicação necessárias para acessar remotamente os medidores, limitando-se apenas a questões básicas como, por exemplo, a necessidade de uma comunicação bidirecional via protocolo de comunicação público. Também são abordadas outras questões básicas como: a necessidade dos registros de frequência de interrupção e duração de interrupção, a aplicação de quatro postos tarifários e a capacidade de atuação e leitura remota, bem como o estabelecimento das grandezas a serem medidas (a saber: tensão, energia elétrica ativa consumida e energia elétrica reativa requerida). Inicialmente, o consumidor poderá acessar as informações de consumo de energia elétrica ativa e reativa através de um mostrador no próprio medidor, que deverá apresentar também o posto tarifário atual e os dados sobre a qualidade da energia recebida, através dos indicadores DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) [7].

Enquanto, mesmo que inicialmente, já houve avanços quanto a uma padronização do *smart metering* residencial, no cenário industrial a situação é bem diferente. De certa maneira, o *smart metering*, através de sensores e atuadores, já está presente em plantas industriais há algum tempo, uma vez que, nesse contexto, há uma maior preocupação com o bom uso dos recursos e com a disponibilidade dos sistemas, pois a eficiência impacta diretamente nas margens de lucro e, por isso, há um maior controle dos processos. Existem várias soluções de medição das mais diversas grandezas projetadas para o ambiente industrial, porém muitas vezes o maior problema está em integrar todas essas soluções a fim de resolver um problema global [10]. No caso da grandeza “consumo de energia”, o mais importante é maximizar a utilização da energia e detectar faltas e, para isso, são projetados sistemas de monitoramento do consumo de energia [11].

Pode-se dizer que esses sistemas de monitoramento de energia são divididos em duas etapas bem definidas: medição e análise. Para a etapa de medição, existem no mercado vários medidores, analisadores e monitores com diferentes funcionalidades e preços – em geral, são caros. As funções básicas de um medidor ou analisador são: medição de tensão, corrente e potência, com a diferença de que o analisador traz também funções de detecção de harmônicos e eventos. Os monitores, especificamente, trazem funções de análise, estatística e cálculo de índices. Já os sistemas de análise são mais complexos e, geralmente, usam protocolos para se comunicarem com os dispositivos de medição, o que traz mais uma vez à tona o problema da integração por falta de padronização. Para resolver os problemas de qualidade do consumo de energia, podem ser usados *wavelets*, redes neurais ou outros algoritmos inteligentes [11].

É importante salientar que, neste trabalho, será dado um maior foco na etapa de medição.

2.3. Eficiência energética no setor produtivo

O conceito básico de eficiência energética está ligado à minimização das perdas nas conversões de energia, bem como no transporte. Assim, é necessário pensar na eficiência tanto da geração – ou seja, transformação de energia primária em energia útil –, quanto na transmissão, no armazenamento, na distribuição e no próprio consumo. A Oferta Interna de Energia (OIE), segundo o Ministério de Minas e Energia, é obtida pela soma das perdas e do consumo final. Pelo gráfico da Figura 2, fica claro que, desde 1970, o consumo aumentou, mas também aumentaram as perdas. Inclusive, de 2003 para 2004, houve um salto de 4,1% nas perdas energéticas [12].

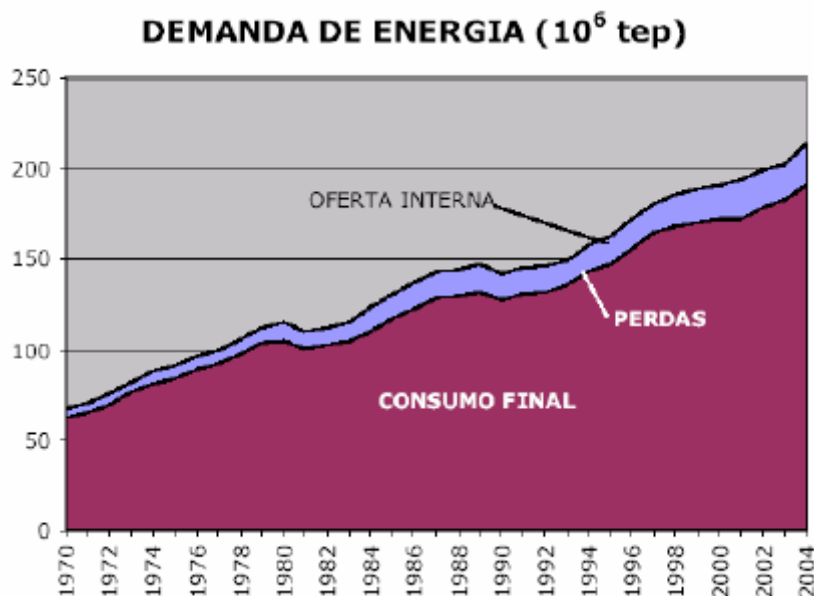


Figura 2 Evolução do consumo e das perdas de energia no Brasil.

Dentro do contexto deste documento, o conceito de eficiência energética será trabalhado na fase de consumo, mais especificamente no setor industrial. Nesse caso, a eficiência energética está diretamente relacionada ao desenvolvimento de equipamentos elétricos de alto rendimento, por exemplo, visto que os equipamentos antigos, muitas vezes ainda em operação, principalmente em plantas industriais antigas, foram projetados com o pensamento de uma época em que os recursos eram fartos, baratos e não havia uma preocupação com questões ambientais [12]. Também é importante, nesse processo, uma preocupação com o planejamento das linhas de produção, inclusive evitando usar a energia nos horários de sobrecarga da rede elétrica.

Apesar das ações de eficiência energética resultarem em uma diminuição das perdas e, consequentemente, uma redução do consumo de energia, empresas privadas brasileiras, em geral, não investem em pesquisa e desenvolvimento nessa área, isso porque o retorno se dá a longo prazo. Como o setor produtivo consome quase metade da energia elétrica produzida no país e, ao mesmo tempo, produz bens de consumo que também dependem dessa energia, o Governo Federal preocupa-se em tomar decisões que impactem diretamente nesse setor. Assim, a tendência é que sejam criadas leis que exijam uma maior eficiência dos equipamentos

elétricos produzidos – a exemplo do que já acontece com os motores trifásicos de indução –, medidas que visam incentivar o desenvolvimento de melhores técnicas e materiais [12].

Dentro das medidas tomadas para que o setor produtivo seja mais eficiente, está o reconhecimento da microeletrônica como área estratégica, através do Programa Nacional de Microeletrônica do Ministério da Ciência e Tecnologia, cuja estrutura é apresentada na Figura 3. A microeletrônica já é largamente utilizada na indústria para comandar circuitos de potência, como é o caso dos controles de partida, velocidade e frequência dos motores de alto rendimento, e também no controle de processos, mas pode ser utilizada para controlar o consumo de energia, além de monitorar perdas energéticas, tornando os equipamentos mais eficientes [12].

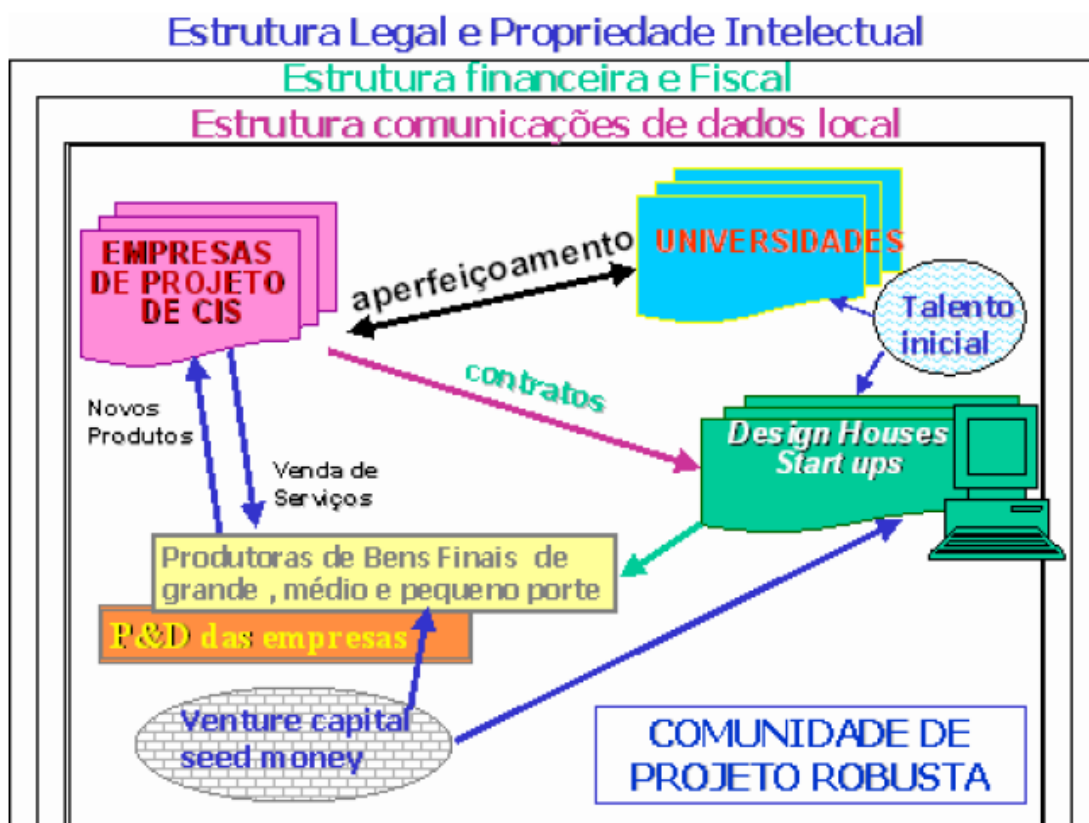


Figura 3 Estrutura do Programa Nacional de Microeletrônica.

Em geral, há poucas ações concretas na área de eficiência energética dentro das empresas e pior: não há uma preocupação contínua em se substituir tecnologias obsoletas e muitos equipamentos de origem estrangeira são mantidos em funcionamento há anos. No máximo, alguns processos recebem adequação no que diz respeito ao controle, com a adição de redes industriais de computadores. Em algumas empresas, existem caldeiras que funcionam há 50 anos e motores há 30. A questão é que substituir equipamentos pode significar a reformulação de parte ou de todo o projeto da planta industrial, o que demanda altos investimentos de retorno a longo prazo e parada na produção [12].

Segundo [13], apenas uma das empresas pesquisadas trabalhava a conscientização de seu pessoal para o consumo de energia e mantinha uma política permanente de atualização dos

equipamentos elétricos dentro de um plano de Gestão Integrada, acreditando que esse é o melhor caminho para um resultado efetivo. As demais empresas apenas têm ações relativas ao consumo de energia dentro de algum dos procedimentos do certificado ISO 9000. E as empresas que estão buscando uma certificação como a ISO 14001, por exemplo, tiveram que definir o consumo de energia por cada um de seus produtos.

Por isso, cabe ao Governo definir e fazer com que sejam cumpridas as leis que exigem melhorias quanto à eficiência energética no setor produtivo, visto que é uma questão estratégica e de interesse para o país. E mais que isso: é importante que sejam adotados mecanismos de incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento dentro das próprias empresas ou à transferência de conhecimento entre a Universidade e o mercado, principalmente para pequenos e médios negócios [12].

2.4. Fundamentos da manutenção

Uma instalação elétrica industrial é um ambiente no qual estão presentes elementos como: condutores, disjuntores, transformadores, motores, fornos elétricos, etc. Nesse tipo de ambiente, os equipamentos estão expostos à umidade, temperatura excessiva, poeira, gases corrosivos, interferência eletromagnética, entre outros fatores adversos que aceleram o desgaste das máquinas, deteriorando, por exemplo, o enrolamento de motores, contatos, componentes ou elementos isolantes [12].

Condutores elétricos deterioram-se por conta do aquecimento e passam a apresentar mais perdas. A deterioração de dielétricos provoca uma perda no isolamento térmico das máquinas, o que ocasiona correntes de fuga excessivas e até a liberação de faíscas. O desgaste nos motores, por sua vez, provoca barulho e vibração. Em geral, a continuidade do uso leva a energia elétrica recebida a se transformar em energia térmica, luminosa, sonora ou vibratória, provocando perdas no rendimento das máquinas [12].

Assim, surge a Manutenção Produtiva Total. Um programa através do qual equipamentos e processos estão continuamente sendo melhorados a fim de se tornarem cada vez mais eficientes e disponíveis. Para alcançar os objetivos desse programa, foram definidas 8 tarefas, que ficaram conhecidas como os 8 pilares da Manutenção Produtiva Total [14], como mostra a Figura 4.

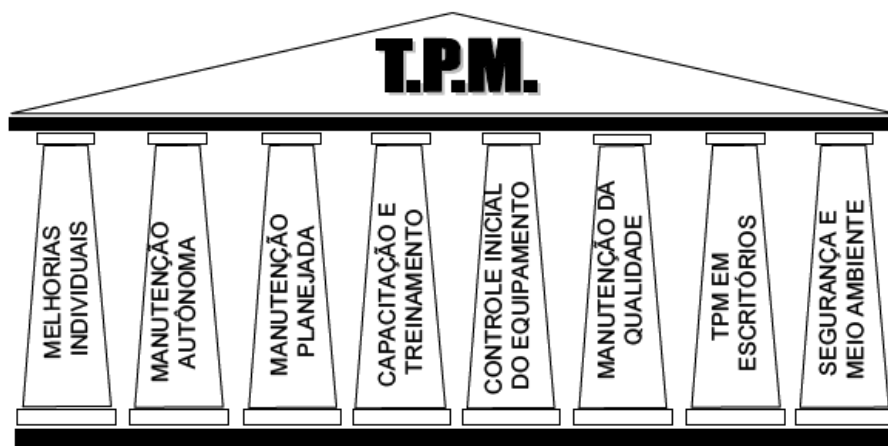


Figura 4 Os 8 pilares da Manutenção Produtiva Total.

O Instituto Japonês de Engenharia de Fábrica define a Manutenção Produtiva Total como sendo uma estratégia de planejamento cujo objetivo é cobrir os seguintes aspectos relativos aos equipamentos de uma planta industrial: planejamento, uso e manutenção que cubra toda a sua vida útil [14].

A gestão da manutenção, por sua vez, consiste na aplicação de padrões e métodos com o objetivo de diminuir o número de intervenções, de maneira a reduzir os custos de manutenção e produção [14]. Pode-se dizer que uma boa gestão da manutenção é aquela que para o equipamento na hora certa, levando em consideração, principalmente, os requisitos de produção e custos.

Existem basicamente três tipos de manutenção: a corretiva, a preventiva e a preditiva [14]. A seguir, cada um desses tipos será explicado com mais detalhes.

2.4.1. Manutenção corretiva

Como a manutenção corretiva apenas é executada caso ocorra falha ou um desempenho abaixo do esperado do equipamento, esse tipo de manutenção ocasiona parada e consequente perda de produção. Em geral, é uma manutenção mais custosa, pois, além de ser imprevisível, acarreta os custos decorrentes do conserto e também da parada na produção. Por esses motivos, é uma prática pouco utilizada nos dias de hoje [14].

A manutenção corretiva pode ser de dois tipos: planejada e não planejada. A principal diferença entre os dois tipos só ocorre quando os equipamentos apresentam um desempenho abaixo do esperado. Nesse caso, pode-se continuar com a produção até que a máquina pare de vez, o que não é recomendado, ou planeja-se uma parada em um momento mais propício, desde que o equipamento não falhe antes disso [14].

2.4.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva, por sua vez, consiste em definir períodos de parada para a manutenção, em geral, indicados pelos fabricantes dos equipamentos. O problema dessa abordagem é que a indicação da frequência de manutenção costuma ser maior do que deveria, para evitar maiores problemas, e nesse caso é possível que se troque mais peças do que o que seria necessário, acarretando maiores custos [14].

2.4.3. Manutenção preditiva

As técnicas de manutenção evoluíram para a manutenção preditiva, que só pode ocorrer se houver um monitoramento dos parâmetros das máquinas. Para isso, é necessário saber de antemão que características e que valores indicam um mau funcionamento dos equipamentos. Por outro lado, ao longo do tempo, as decisões ficam cada vez mais precisas, de acordo com experiências passadas. Como a manutenção ocorre com base em dados e não em hipóteses – como é o caso da manutenção preventiva –, pode-se dizer que, com o uso da manutenção preditiva, os equipamentos podem operar pelo máximo de tempo possível antes de se fazer uma intervenção [14].

Em suma, a manutenção preditiva é aquela que monitora os equipamentos a fim de maximizar o tempo entre reparos por falhas (manutenção corretiva) e reparos programados (manutenção preventiva), o que gera uma consequente maximização da produtividade, já que,

teoricamente, estaremos com os equipamentos disponíveis e em bom estado de funcionamento durante a maior parte do tempo [15].

É importante salientar que esse tipo de manutenção demanda um maior investimento inicial em dispositivos de monitoramento, fato que é justificado pela apresentação de resultados mais precisos com relação a outras abordagens. O que, geralmente, se faz é aplicar a manutenção preditiva nas máquinas mais críticas para o processo ou mesmo as mais caras dentro da planta industrial. Apesar disso, a manutenção preditiva é considerada a modalidade fundamental para um diferencial de produtividade, pois aumenta a confiabilidade e disponibilidade, aumenta a vida útil das peças, equipamentos, e instalações, melhora a segurança dos processos e das pessoas, entre outras vantagens [15].

Dito isso, fica claro que manutenção preditiva e *smart metering* estão intimamente relacionados: ambos necessitam do monitoramento e da análise de certas variáveis. Em ambientes industriais onde há um sistema de medição destinado à manutenção preditiva, fica mais fácil implementar *smart metering*, visto que toda a infraestrutura de comunicação e controle seria aproveitada, com a adição de sensores específicos para monitorar os parâmetros relativos ao consumo de energia. O mesmo pode ser dito para plantas industriais modernas, com alto nível de automatização.

Um método interessante de aplicação da manutenção preditiva usa padrões de vibração e diagnóstico através de lógica *fuzzy* para detectar falhas incipientes em máquinas de movimento rotativo. O uso dessa técnica é compatível com os princípios da eficiência energética, o que leva à conclusão de que, se todas as empresas trabalhassem com foco em eficiência, não se cogitaria o uso de outro tipo de manutenção, senão a preditiva [12].

2.5. Fator de potência

Alguns equipamentos encontrados em plantas industriais são cargas de característica indutiva, a exemplo dos motores. Esse tipo de carga precisa não apenas de potência ativa (aquela que é, de fato, consumida), mas também de potência reativa, a fim de manter um campo eletromagnético necessário ao seu funcionamento. Assim, a potência reativa, que não produz trabalho, acaba ocupando o espaço que poderia ser destinado a uma quantidade maior de potência ativa [16]. A Figura 5 ilustra os dois tipos de potência anteriormente descritos.

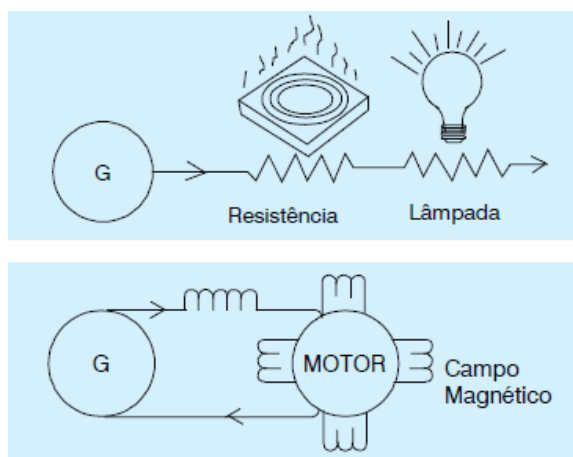


Figura 5 Potências ativa e reativa.

A potência aparente, por sua vez, é a soma vetorial entre as potências ativa e a reativa, como mostra a Figura 6 a seguir.

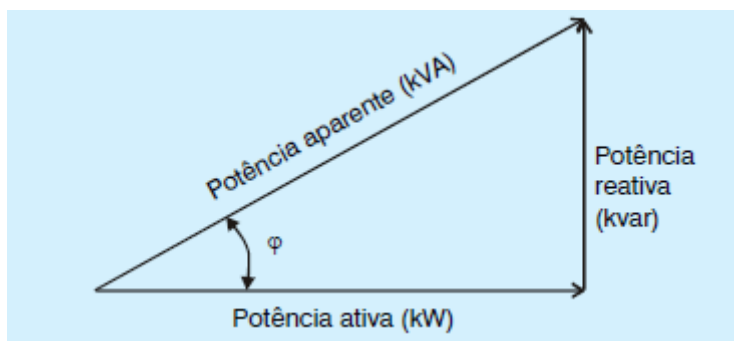


Figura 6 Relação entre as potências ativa, reativa e aparente.

Por fim, o fator de potência é a razão entre a potência ativa e a aparente. Esse fator, portanto, mede a eficiência do consumo de energia. Um alto fator de potência significa maior eficiência, enquanto que, inversamente, um baixo fator de potência significa menor eficiência [16].

O excesso de potência reativa resulta em um aumento na quantidade de corrente circulando nos sistemas. Essa sobrecarga gera uma série de problemas, entre eles: aumento das perdas elétricas nos condutores devido ao aquecimento, necessidade de aumento do diâmetro dos condutores e da capacidade dos componentes de proteção, quedas e flutuações de tensão nos circuitos, subutilização da capacidade instalada, aumento na conta de energia e sobrecarga dos equipamentos [16].

Em uma instalação industrial, as causas para um baixo fator de potência são inúmeras. A seguir, listamos algumas das mais comuns [16]:

- Motores de indução trabalhando a vazio;
- Motores superdimensionados;
- Transformadores trabalhando a vazio ou com pouca carga;
- Presença de reatores de baixo fator de potência;
- Presença de fornos de indução ou a arco;
- Presença de máquinas de tratamento térmico ou de solda;
- Tensão acima do valor nominal.

Para corrigir o fator de potência, instalam-se bancos de capacitores próximos às máquinas de maneira que a potência reativa necessária seja fornecida. Ainda assim, recomenda-se que, antes da instalação dos capacitores, seja feito um estudo para diminuir o uso de potência reativa. Algumas ações que melhoram esse aspecto: desligamento de motores e outras cargas indutivas que estejam ociosos e um melhor dimensionamento dos mesmos [16]. A Figura 7 mostra um esquema geral do processo de correção do fator de potência.

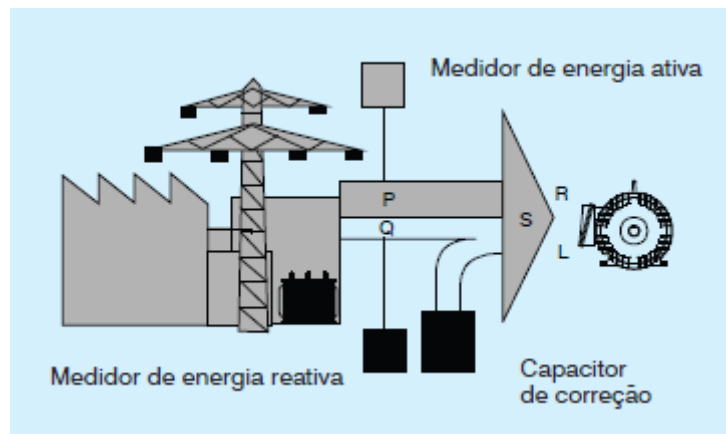


Figura 7 Esquema geral do processo de correção do fator de potência.

Além das consequências já citadas anteriormente de se manter um baixo fator de potência, há mais um aspecto a ser considerado: a legislação. A lei mais atual define que o fator de potência mínimo deve ser de 92% (antes, o limite era 85%) e, a partir desse valor, é cobrada uma taxa pela energia reativa excedente consumida. Para clientes das classes de consumo cuja cobrança é feita de acordo com o horário, a avaliação do fator de potência passa a ser feita por hora e não mais por mês, como acontece com o demais consumidores [16].

Assim, as concessionárias passam a faturar não pela falta de cumprimento do limite de fator de potência, mas pela quantidade de potência ativa que poderia ser transportada no lugar desse consumo reativo. É por esse motivo que clientes que recebem na alta tensão pagam não apenas pelo consumo de fato, mas pela demanda tanto no horário de pico, quanto fora dele [16].

2.6. Produtividade

As empresas de hoje enfrentam grandes desafios. Ao mesmo tempo em que atingem novos mercados, sofrem também uma pressão competitiva cada vez maior. A produção precisa ser rápida e eficiente, ao passo que os produtos devem ser de alta qualidade, de forma a atingir as expectativas dos clientes. E, em meio a isso tudo, é preciso cumprir regulamentações das mais diversas ordens [17].

Para alcançar uma alta produtividade, as empresas adotam estratégias diferentes, porém todos concordam que oferecer soluções personalizadas e serviços tornou-se indispensável. Outra abordagem muito utilizada foca na diversidade da produção. Grandes empresas como a Siemens, por exemplo, provêm soluções e tecnologias que vão desde automação e tecnologias dirigidas à integração de sistemas industriais via *software* até serviços de consultoria altamente personalizados [17].

A Siemens acredita que o caminho para uma maior produtividade está em, a partir da *expertise*, aliar as poderosas tecnologias de automação a um *software* industrial inteligente. Essa estratégia permite que companhias façam o seu planejamento baseado em uma simulação de processos ou até de plantas industriais completas. O resultado é uma diminuição de cerca de 50% do *time-to-market*, um alto nível de qualidade dos produtos e uma redução significativa nos gastos de água e de energia [17]. A Figura 8 mostra um fluxo universal de informação, do projeto ao produto final, necessário para um maior controle da produção.

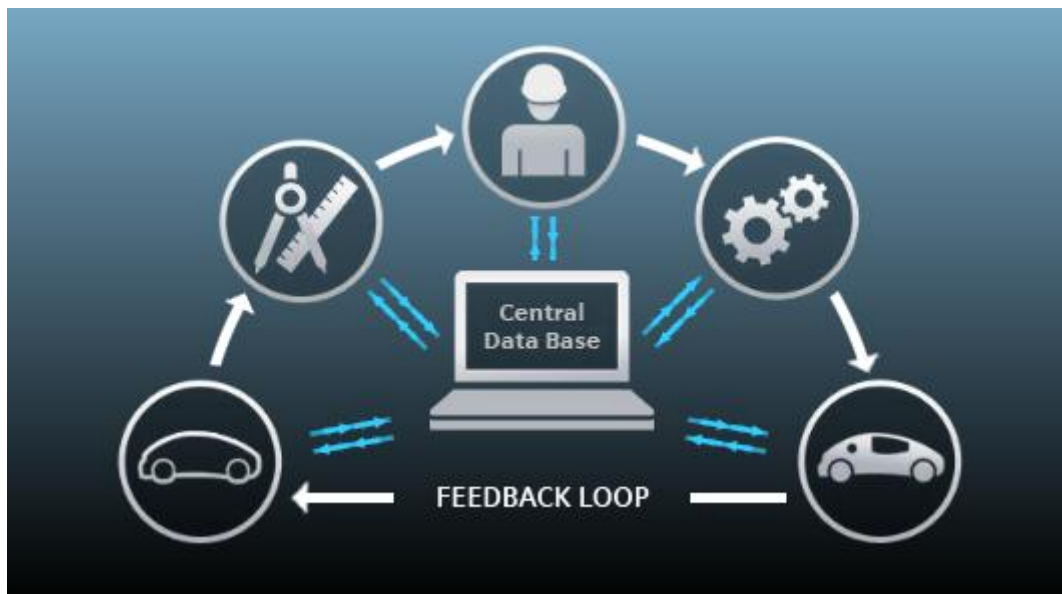


Figura 8 Fluxo universal de informação.

3. Problema

O ciclo de produção e entrega da energia elétrica é, basicamente, dividido em quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo.

No Brasil, a maior parte da energia gerada provém de hidrelétricas, usinas que transformam a energia mecânica da queda d'água em energia elétrica através de imensas turbinas [18]. Porém, de uma maneira geral, a geração de energia baseia-se na transformação de um tipo de energia primária em eletricidade, seja ela: térmica, mecânica de diversos tipos, luminosa, nuclear, etc.

O sistema de transmissão, por sua vez, consiste em um conjunto de condutores e transformadores responsáveis por transportar a energia elétrica produzida por longas distâncias até os sistemas de distribuição. Essa energia é transmitida em regime de corrente alternada a altas tensões (da ordem de 138 a 500 kV) de forma que a corrente seja baixa e, portanto, os condutores sejam menores, bem como sejam reduzidas as perdas por aquecimento [18].

A etapa de distribuição agrega um conjunto de subestações. É nessa etapa que a energia é transformada para ser entregue aos consumidores finais. Os sistemas de distribuição trabalham com várias faixas de tensão, de acordo com a classe de consumo dos clientes. A Tabela 1 mostra a divisão das classes de consumo aplicada pela Eletrobras em Alagoas [19].

Tabela 1 Divisão das classes de consumo aplicada pela Eletrobras no estado de Alagoas.

Alta tensão		Baixa tensão	
A1	230 kV ou mais	B1	Residencial
A2	88 a 138 kV	B2	Rural
A3	69 kV	B3	Industrial / Comercial
A3a	30 a 44 kV	B4a	Iluminação Pública
A4	2,3 a 25 kV	B4b	Iluminação Pública
AS	Subterrâneo	B4c	Iluminação Pública

É importante comentar que, para os clientes de alta tensão, são aplicadas taxas horo-sazonais, ou seja, considera-se o horário, bem como o período do ano (chuvoso ou seco) em que é utilizada a energia. Nesses casos, além da cobrança comum, por kWh, é aplicada uma cobrança por demanda [19]. Para explicar o conceito de demanda, considera-se uma planta industrial com 3 motores: durante 3 minutos, apenas 1 motor está ligado (30 kW), nos 7 minutos a seguir, 2 motores estão ligados (60 kW) e, nos 5 minutos finais, os 3 motores estão ligados ao mesmo tempo (120 kW). Nesse caso, a demanda será calculada segundo a fórmula abaixo.

$$D = (30kW \times 3min + 60kW \times 7min + 120kW \times 5min) \div 15min \cong 75,67kW$$

A etapa de consumo é a última do ciclo e consiste em utilizar a energia elétrica que chega até as residências, comércio, indústria, etc. para alimentar equipamentos que transformarão a eletricidade em trabalho útil. A Figura 9 mostra um resumo do ciclo de produção e entrega da energia elétrica.

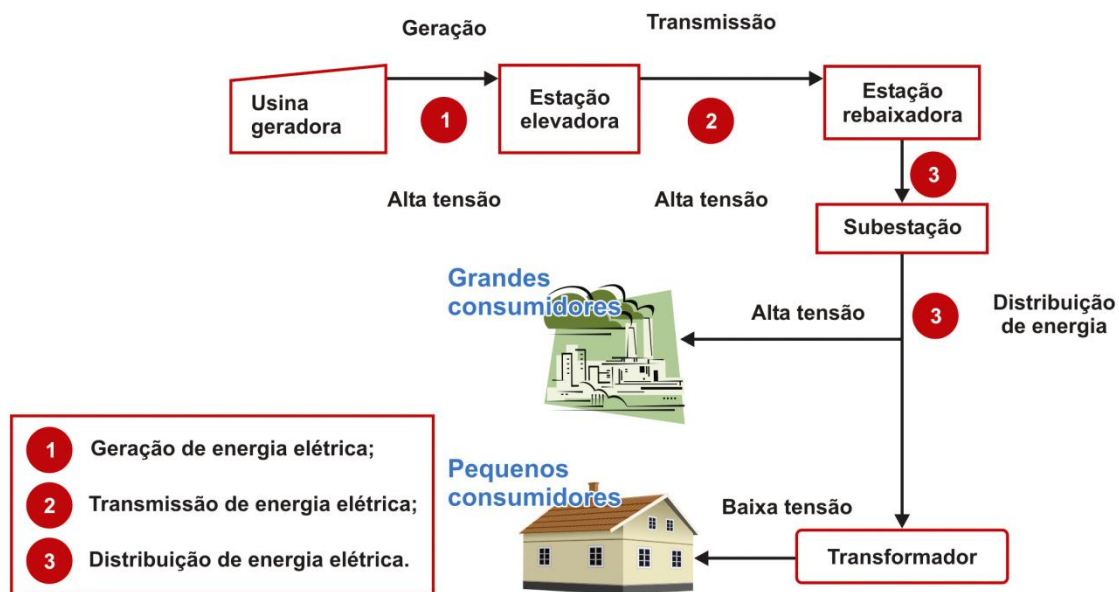


Figura 9 Ciclo de produção e entrega da energia elétrica.

Especificamente com relação à indústria, o consumo de energia em geral é alto. No Brasil, em 2008, o setor industrial era responsável por 40,7% do consumo total [20]. Só de 2001 para 2002, o consumo desse setor teve um aumento de 6,6%, que se deu, principalmente, pelo aumento nas exportações e o fim do racionamento de 2001. A Figura 10 mostra a evolução do consumo de energia elétrica por setor no Brasil desde 1970 até 2004 [12].

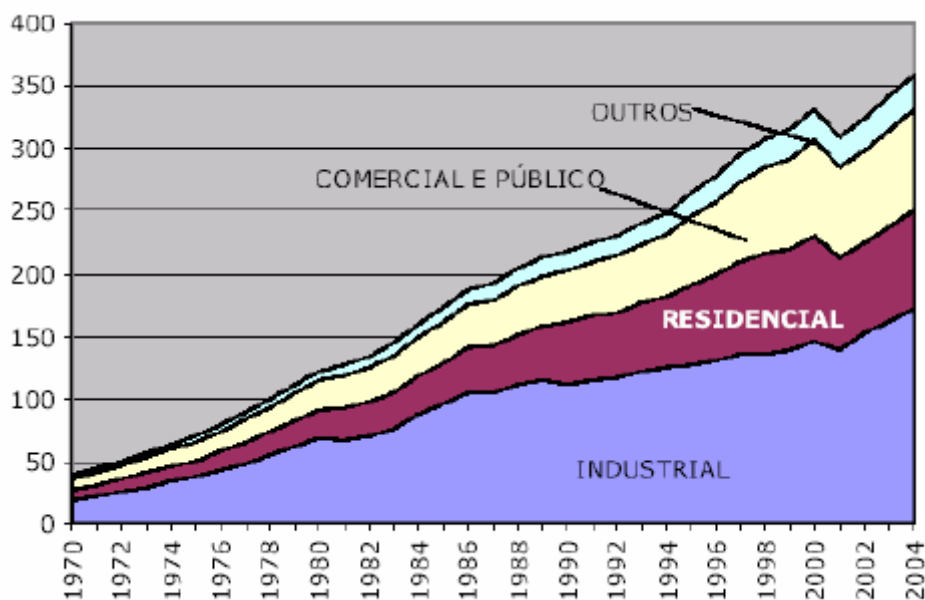


Figura 10 Evolução do consumo de energia elétrica no Brasil (GWh).

Nos anos de 2001 e 2002, época do racionamento de energia, as indústrias precisaram fazer severos cortes em suas produções, a fim de preservarem os seus negócios. Desde então, naturalmente, persiste a ideia de que eficiência energética está associada ao corte de energia, mas não é bem isso. Um estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria e a Eletrobras, por meio do Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), concluiu que

há um potencial técnico de redução de 25,7% do consumo global de energia da indústria brasileira, dos quais 82% estão relacionados a combustíveis. Mesmo assim, só o potencial de redução do consumo de energia elétrica representa uma economia de R\$ 6,8 bilhões/ano (valor calculado com base em informações da Aneel de 2007) e 14% desse potencial está concentrado nos sistemas motrizes. A Tabela 2 ilustra o potencial de economia de energia elétrica, por uso final, para diferentes setores industriais [20].

Tabela 2 Potencial de economia de energia elétrica, por uso final, para diferentes setores industriais.

Usos industriais da energia	Potencial de economia	Representação no total de economia	Setores com maior potencial de eficiência
Força motriz	2.032.439,53	13,87%	Siderurgia Extrativa mineral Alimentos e bebidas
Refrigeração	46.581,66	0,32%	Alimentos e bebidas Químico Têxtil
Fornos elétricos	370.873,53	2,53%	Siderurgia Metais não ferrosos Ferros ligas
Eletrólise	191.387,34	1,31%	Metais não ferrosos Química Papel e celulose
Iluminação	60.214,47	0,41%	Alimentos e bebidas Têxtil Extrativa mineral Papel e celulose
Outros	2.368,18	0,02%	Extrativa mineral

Nesse mesmo estudo, foram levantadas hipóteses para tentar explicar o motivo pelo qual, apesar de haver potencial de economia, as empresas brasileiras não conseguem implantar programas de eficiência energética. Uma das causas apontadas está relacionada à legislação, que seria desfavorável a investimentos em eficiência. Outro motivo seria a ausência ou não adequação das linhas de investimento para ações de eficiência energética. E, por fim, a falta de pessoal capacitado tanto para identificar as oportunidades de eficiência, quanto para fazer a gestão dos projetos, aliada à aversão aos riscos técnicos inerentes a tecnologias inovadoras [20].

Apesar disso, as oportunidades existem e o Brasil está cada vez mais próximo de identificá-las e aproveitá-las, como prova o estudo anteriormente citado. As regulamentações da Aneel com relação aos *smart meters*, apesar de lentas, também são uma prova de que o pensamento vigente já está mudando. Com a implantação do *smart grid*, que na maioria das vezes começa pelo *smart metering*, seria possível para o setor industrial melhorar a sua produtividade e, consequentemente, a sua competitividade através de ações de eficiência energética. E mais: com um melhor monitoramento do consumo de energia, fica mais fácil para os gestores decidir qual a melhor maneira de se comprar a energia a ser consumida. Por exemplo, definir se mais vale comprá-la diretamente às concessionárias ou produzir a própria energia

(cogeração). Nesse contexto, encaixa-se também a compra e venda de energia excedente, através do mercado livre de energia, que, no Brasil, está previsto em um Projeto de Lei do Senado (PLS 402/09) ainda em tramitação [21].

Fica claro que as decisões do Governo são bastante lentas e as empresas não podem simplesmente esperar medidas governamentais para operar mudanças em suas plantas industriais. Assim, o mercado e a pesquisa – em geral, de fora do Brasil – passam a oferecer soluções tanto de *smart meters*, quanto de *softwares* de gerenciamento, a fim de aproveitar o potencial de economia de energia elétrica disponível.

4. Soluções existentes

O primeiro passo para se alcançar um consumo eficiente de energia elétrica é a instalação de sistemas de monitoramento. Sistemas desse tipo são compostos, basicamente, por três partes [7]:

- Medidores eletrônicos com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação (*smart meters*);
- Infraestrutura de comunicação de via dupla entre os medidores e uma central de controle de medição;
- *Softwares* de aquisição automática de dados, de envio remoto de dados de controle e de gerenciamento do sistema (gestão de ativos, segurança da informação e análise dos dados).

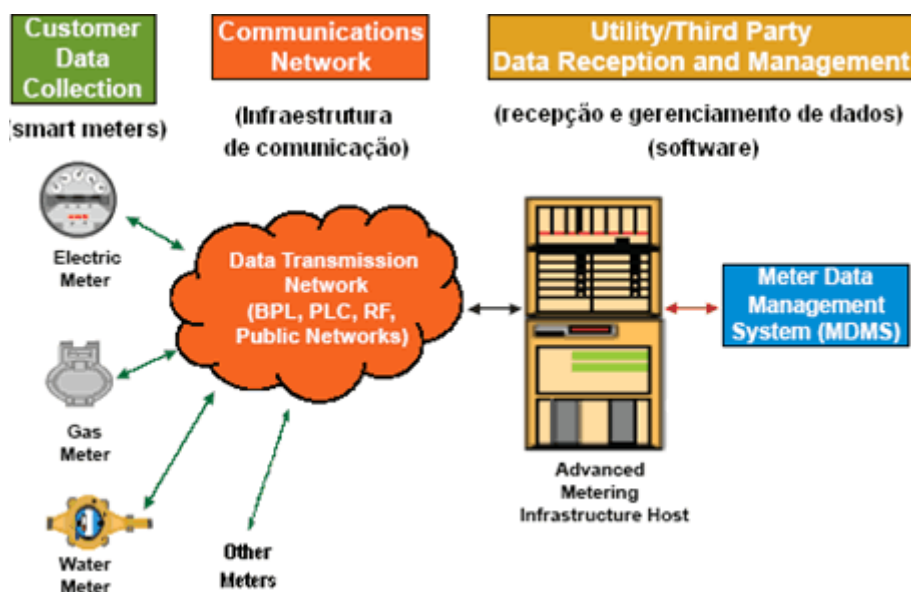


Figura 11 Esquema geral de um sistema de monitoramento.

A Figura 11 mostra um esquema geral do sistema de monitoramento anteriormente descrito e fica claro que ele foi concebido para as concessionárias de energia. Entretanto, como foi apresentado no final do capítulo anterior, muitas vezes as indústrias, principalmente as maiores, não precisam depender de outras empresas (como as concessionárias) ou do Governo para definir ações internas de eficiência. Assim, a partir do modelo proposto na Figura 11, este trabalho pretende analisar as soluções já existentes para o setor industrial com foco, principalmente, nos medidores e na infraestrutura de comunicação.

4.1. Principais padrões

Existem vários padrões relacionados direta ou indiretamente aos *smart meters*, mas é importante entender que nem sempre todos são reconhecidos ou adotados. Há basicamente dois padrões internacionais largamente reconhecidos para a comunicação de dados com medidores. Os padrões ANSI C12 são muito bem aceitos nos Estados Unidos, enquanto que os padrões IEC 62056 são mais bem aceitos na Europa [7]. No Brasil, além da regulamentação da Aneel, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – órgão responsável por representar o Brasil perante os organismos internacionais de normalização – convocou dois grupos de

trabalho, o GT-7 e o GT-12, compostos por representantes das indústrias, concessionárias de energia e centros de pesquisa, para discutir questões relativas à padronização dos medidores eletrônicos para medição de energia elétrica. Assim, foram revisadas as seguintes normas [22]:

- ABNT NBR 14519 – Especificação dos medidores eletrônicos de energia elétrica;
- ABNT NBR 14520 – Método de ensaio dos medidores eletrônicos de energia elétrica;
- ABNT NBR 14521 – Procedimento de aceitação de medidores eletrônicos de energia elétrica.

A partir de então, criou-se o regulamento técnico metrológico RTM 431/2007, que estabelece os critérios de certificação para os medidores eletrônicos de energia elétrica aplicados ao faturamento do consumo, em conformidade com os padrões internacionais definidos pelas respectivas normas IEC para medidores [22].

4.1.1. ANSI C12

O C12 é composto, principalmente, pelos seguintes padrões: C12.18, C12.19, C12.20, C12.21 e C12.22. C12.18 e C12.21 descrevem protocolos de comunicação via dupla com o medidor, sendo o primeiro para infravermelho e o segundo uma extensão do primeiro para protocolos seriais em geral [7].

C12.19 define a estrutura de dados a ser transferida do medidor para o módulo de comunicação, apesar de não especificar linguagem ou protocolo de comunicação. C12.22, por sua vez, é uma evolução de C12.18 e C12.21, pois define a transferência das estruturas de C12.19 sobre qualquer tipo de rede [7].

4.1.2. IEC 62056

O IEC 62056 é a terceira edição do IEC 61107, que ainda é bastante usado por sua simplicidade e boa aceitação. O padrão IEC 61107 utiliza comunicação serial – RS-232 ou RS-485 – para enviar dados no formato de caractere ou de bit. Como meio físico, pode ser usado tanto uma interface óptica, quanto um par de fios (na verdade, é como se fosse uma combinação dos padrões C12.18 e C12.21) [7].

Já a interface do IEC 62056 é independente da camada de protocolo de transferência dos dados e cada objeto enviado é identificado por um código único. É importante comentar que esses padrões apenas definem a troca de dados entre o medidor e a central de controle de medição, mas não preenchem todos os requisitos de um *smart grid* [7].

4.1.3. Outros

Alguns padrões de comunicação largamente utilizados [7]:

- Euridis – definido para fio de par trançado;
- M-bus – definido tanto para fio de par trançado, quanto para wireless;
- IEC 61334 S-FSK – definido para transmissões a baixas taxas, usando *Power Line Communication* (PLC) faixa estreita.

Existe também o AMI-SEC, que estabelece requisitos para segurança da informação, como políticas de autenticidade, confidencialidade, integridade e disponibilidade, e para sistemas de

backup e auditoria. E, por fim, o NEMA, que define requisitos para a atualização do *firmware* de *smart meters* [7].

4.2. Soluções de medição

Para executar a medição do consumo de energia elétrica, pode-se dizer que existem três principais abordagens: medição do consumo total, medição do consumo por equipamento a partir de múltiplos pontos e medição do consumo por equipamento a partir de um único ponto.

A medição do consumo total é a mais largamente difundida, inclusive é a abordagem utilizada pelos medidores de consumo das concessionárias, sejam eles eletrônicos ou mesmo os antigos eletromecânicos. Porém essa abordagem não é a mais interessante para um monitoramento do consumo de energia elétrica que tenha a intenção de gerenciar melhor os recursos. O ideal é que se saiba exatamente quanto está sendo consumido por cada um dos equipamentos ligados à rede. Só assim é possível detectar mudanças no padrão de funcionamento desses equipamentos ou mesmo verificar se as perdas da própria rede são significativas o bastante para aumentar o consumo de energia elétrica.

Apesar de a abordagem distribuída monitorar um número maior de variáveis e apresentar informações mais específicas, o custo da instalação de um sistema nesses moldes pode aumentar muito, dependendo do número de equipamentos a serem monitorados, já que a medição é individualizada. Por isso, estão sendo feitas as pesquisas [23] e [24] para identificar os equipamentos ligados à rede e monitorá-los, a fim de calcular o consumo individual a partir de um único ponto. O princípio básico dos métodos desenvolvidos está em monitorar a rede para detectar os padrões de ruído deixados pelos equipamentos e reconhecê-los como sendo uma espécie de assinatura que identifica unicamente cada um deles. Mas, por enquanto, o foco dessas pesquisas está na medição do consumo de energia elétrica residencial.

Sabe-se que o ambiente industrial é hostil, com a presença de ruídos eletromagnéticos de grande intensidade, devido às altas correntes necessárias ao acionamento de motores elétricos, por exemplo. Por esse motivo, é provável que as técnicas anteriormente citadas não sejam aplicáveis a plantas industriais mais complexas. Assim, já que não foram encontrados trabalhos nesse sentido, considera-se que a melhor solução ainda é a medição do consumo individual através de sensores dedicados.

Para implementar esses sensores, são necessárias, essencialmente, duas etapas. A primeira consiste em medir a corrente e a segunda, em calcular as grandezas necessárias como, por exemplo, potência ativa, potência aparente, potência reativa e fator de potência.

4.2.1. Medição de corrente

A seguir, serão apresentados os três principais métodos de medição de corrente existentes [25].

Resistor shunt

O resistor *shunt* é, na verdade, um resistor colocado em série com a carga cuja corrente se quer medir. Dessa forma, segundo a Lei de Ohm, sobre o resistor *shunt* existirá uma tensão proporcional à corrente que está passando pela carga. Existem resistores *shunt* denominados

shunts DC, isso por causa da indutância interna, que limita a resposta em frequência do dispositivo. Os *shunts* DC são mais baratos e apresentam alta precisão para medições de correntes de até 3A. Os resistores *shunt* projetados com uma indutância interna minimizada são denominados *shunts* AC. Os *shunts* AC apresentam a maior faixa de frequência de trabalho dentre os métodos de medição de corrente, porém são mais caros que os *shunts* DC. A Tabela 3 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens de ambos os tipos de resistores *shunt* [25].

Tabela 3 Vantagens e desvantagens do uso de resistores *shunt*.

	Vantagens	Desvantagens
Shunt DC	• Fácil de entender • Alta confiabilidade • Não possui <i>offset</i> • Método de mais baixo custo para a medição de corrente contínua abaixo de 500 A	• Não provê isolamento elétrico • Insere perdas de tensão ao sistema • Aumenta o aquecimento do sistema • Difícil de instalar • Mede bem corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência • Aumenta de tamanho de acordo com o aumento da corrente a ser medida
Shunt AC	• Fácil de entender • Alta confiabilidade • Não possui <i>offset</i> • Mede bem corrente contínua ou corrente alternada tanto de baixa quanto de alta frequência	• Alto custo • Não provê isolamento elétrico • Insere perdas de tensão ao sistema • Aumenta o aquecimento do sistema • Difícil de instalar • Aumenta de tamanho de acordo com o aumento da corrente a ser medida

Transformador de corrente

O transformador de corrente e o sensor de efeito Hall baseiam-se no mesmo princípio: dado um fluxo de corrente, um campo magnético é gerado de acordo com a Lei de Ampère. Assim, o campo magnético gerado pela corrente no primário do transformado induz uma corrente proporcional no secundário, idêntico ao que acontece com os transformadores de tensão. A proporcionalidade é dada pela razão entre o número de espiras do primário e do secundário [25]. A Figura 12 mostra o esquema de um transformador de corrente. Já a Tabela 4 apresenta as vantagens e desvantagens de se usar um transformador de corrente.

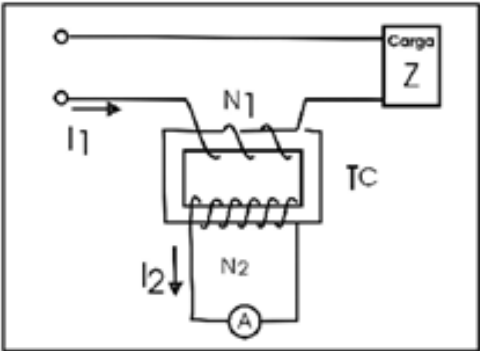


Figura 12 Esquema de um transformador de corrente.

Tabela 4 Vantagens e desvantagens do uso de transformadores de corrente.

Vantagens	Desvantagens
Método de baixo custo para a medição de corrente alternada abaixo de 100 A	Mede apenas corrente alternada
Provê isolamento elétrico	A saída é dependente da frequência
Entrega corrente como saída que pode ser facilmente convertida para tensão	Aumenta de tamanho de acordo com o aumento da corrente a ser medida
Alta confiabilidade	Insere perdas de tensão alternada ao sistema

Sensor de efeito Hall

O sensor de efeito Hall é, na verdade, um núcleo magnético ao qual está incorporado um gerador Hall, dispositivo cuja saída é um valor de tensão proporcional ao campo magnético induzido pela corrente dada como entrada. Como o sinal de saída do gerador Hall é muito pequeno, faz-se necessária a presença de um amplificador. Os sensores de efeito Hall podem ser de dois tipos: de malha aberta ou de malha fechada [25]. A Figura 13 mostra um exemplo de sensor de efeito Hall de malha aberta e outro de malha fechada.

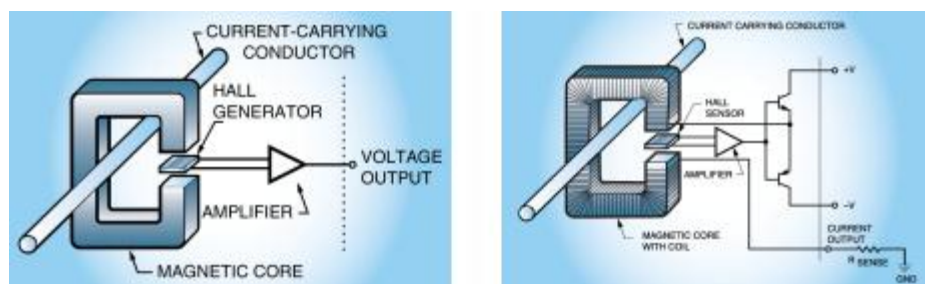


Figura 13 Sensor de efeito Hall de malha aberta e sensor de efeito Hall de malha fechada.

A diferença básica entre os dois tipos está no amplificador de saída do gerador Hall. Enquanto no sensor de malha aberta esse amplificador é um operacional simples, no sensor de malha fechada o amplificador é um *push-pull*. Essa troca acaba por eliminar a dependência do resultado na linearidade do núcleo magnético e do gerador Hall [25]. A Tabela 5 mostra as vantagens e desvantagens do uso de sensores de efeito Hall.

Tabela 5 Vantagens e desvantagens do uso de sensores de efeito Hall.

Vantagens	Desvantagens
Mede tanto corrente contínua quanto corrente alternada	Possui <i>offset</i>
Método de mais baixo custo para a medição de corrente contínua ou alternada acima de 500 A	Difícil de entender
Provê isolamento elétrico	-
Alta confiabilidade	-

4.2.2. Cálculo das grandezas

Existem várias abordagens para o cálculo das grandezas necessárias à medição do consumo de energia elétrica. A seguir, são listadas cinco possíveis abordagens [26]:

Analog Front-End (AFE)

Os AFEs são circuitos integrados de propósito específico, que recebem como entrada os valores medidos através de um dos métodos anteriormente descritos e fazem as conversões necessárias para o cálculo de grandezas como, por exemplo, a potência ativa [27]. A Tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens do uso de AFEs [26], enquanto que a Tabela 7 mostra uma comparação entre algumas das características de AFEs produzidos pela Cirrus Logic [28].

Tabela 6 Vantagens e desvantagens do uso de AFEs.

Vantagens	Desvantagens
O cálculo das grandezas é feito via <i>hardware</i>	Alto custo com relação aos MCUs
Alta precisão	Necessita de um dispositivo extra que interprete os dados

Tabela 7 Comparação de características dos AFEs produzidos pela Cirrus Logic.

CI	CS5480	CS5484	CS5490	CS5451A	CS5463	CS5464	CS5467
ADC	3	4	2	6	2	3	4
Sensores de corrente	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT	<i>Shunt</i> / CT
Precisão da potência ativa	0,1%	0,1%	0,1%	N/A	0,1%	0,1%	0,1%
Precisão da potência reativa	0,1%	0,1%	0,1%	N/A	0,2%	0,2%	0,2%
Precisão da corrente RMS	0,1%	0,1%	0,1%	N/A	0,2%	0,2%	0,2%
Serial	SPI / UART	SPI / UART	UART	SPI	SPI	SPI	SPI
Saídas digitais	3 saídas configuráveis	4 saídas configuráveis	1 saída configurável	-	Pulso de energia	Pulso de energia	Pulso de energia
Tensão de entrada (V)	3,3	3,3	3,3	3	5	5	5
Consumo (mV)	13	13	13	23	21	25	25

Microcontrolador de propósito geral (MCU)

Enquanto AFEs oferecem uma solução de medidor de energia fechada em um único circuito integrado, os MCUs, por serem mais flexíveis, permitem várias abordagens diferentes para essa mesma aplicação. Em muitos projetos de medidor de energia usando MCU, usa-se um AFE como, por exemplo, um dos circuitos integrados da família CS548/9X apresentada acima para fornecer as funções de medição e de conversão de dados. Em outros casos, periféricos e amplificadores operacionais são utilizados como interface analógica. A escolha por uma das duas abordagens deve ser baseada em requisitos de projeto como: precisão das medições,

informações necessárias, facilidade de atualização do projeto e restrições de custo [27]. A Tabela 8 a seguir apresenta as vantagens e desvantagens de se usar MCUs [26].

Tabela 8 Vantagens e desvantagens do uso de MCUs.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo	Precisão inicialmente indefinida
Flexibilidade na escolha da interface analógica a ser utilizada	Necessidade de programação

Outra opção para os projetistas seria a utilização de MCUs com periféricos específicos que alguns fabricantes colocaram à venda. A Microchip, por exemplo, lançou o PIC18F8490, um MCU de 80 pinos com interface para *display* LCD e 12 canais de conversão de analógico para digital de 10 bits. A Microchip também colocou no mercado o 16F877, um MCU de 8 bits com 40 pinos, 8 canais de analógico para digital de 10 bits e memória interna. A fabricante Maxim, por sua vez, lançou o MAXQ3120, um MCU de 16 bits que inclui dois conversores de analógico para digital de 16 bits, duas portas UART e um controlador de *display* LCD. E, por fim, a Atmel, que lançou no mercado o ATMEGA406, com controlador de *display* LCD integrado, além de 10 conversores de analógico para digital do tipo sigma-delta de 12 bits [27].

É importante salientar que a abordagem híbrida oferece flexibilidade, pois dá ao projetista a opção de escolher um AFE que melhor atenda às necessidades do projeto, bem como um MCU com a combinação de memória, controlador de *display* LCD e entradas e saídas mais adequado às especificações da aplicação.

System on a Chip (SoC)

Ao contrário da abordagem híbrida que integra AFEs e MCUs, o uso de SoCs traz limitações ao projeto de medidores de energia. A questão é que, em geral, SoCs são a combinação de um conjunto pré-definido de funcionalidades de AFEs e MCUs em um único encapsulamento. Como não há flexibilidade na escolha dessas funcionalidades, paga-se por funções muitas vezes desnecessárias, o que acaba encarecendo o projeto [29]. A Tabela 9 mostra as vantagens e desvantagens em se utilizar SoCs [26], enquanto que a Tabela 10 apresenta uma comparação entre algumas das características de SoCs produzidos pela Maxim [30].

Tabela 9 Vantagens e desvantagens do uso de SoCs.

Vantagens	Desvantagens
O cálculo das grandezas é feito via <i>hardware</i>	Maior custo em comparação ao uso de MCUs
Alta precisão	Necessidade de programação
Não é necessário um dispositivo extra para interpretar os dados	-

Tabela 10 Comparação de características dos SoCs produzidos pela Maxim.

CI	78M6631	78M6613	78M6618	78M6612
MCU	80515	80515	80515	80515
Tensão de entrada (V)	3,3	3,3	3,3	3,3

Sensores de entrada	6	4	10	4
Memória Flash (KBytes)	128	32	128	32
Memória RAM (KBytes)	4	2	4	2
Interface de comunicação	SPI / UART	UART	SPI / UART	UART

4.3. Soluções de comunicação

Para a aplicação de medição do consumo de energia elétrica em um ambiente industrial, existem, basicamente, dois níveis de comunicação. Um é uma rede que interliga as concessionárias aos seus consumidores e serve, principalmente, para realizar a cobrança automatizada da conta de energia. O outro nível, por sua vez, é uma rede local cujos nós são os dispositivos de medição e sua função básica é enviar os dados coletados a uma central onde será feita a análise global do consumo. Assim, com foco na rede local anteriormente citada, serão apresentadas algumas das possíveis soluções de comunicação para a implantação de redes desse tipo.

É importante comentar que, em plantas industriais mais complexas, onde os processos são automatizados, já existem redes de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) que podem ser aproveitadas para a medição do consumo de energia elétrica. Os CLPs são computadores especialmente projetados para desempenhar funções de controle em ambientes industriais e, portanto, desde que sejam adicionados sensores específicos, podem servir tanto para a etapa de cálculo das grandezas de consumo, quanto para a comunicação, através de protocolos da camada de aplicação como o Modbus da Schneider Electric ou Profibus da Siemens, que utilizam RS-232 ou RS-485 como padrão elétrico.

Outros padrões de comunicação serão apresentados nas seções que se seguem.

4.3.1. Power Line Communications

Dentre as opções de comunicação com fio existentes, o uso de estruturas já instaladas, como o exemplo das redes de CLPs anteriormente citado, é uma opção bastante interessante para a redução de custos. Ainda nesse raciocínio, pode-se considerar também o uso da rede elétrica como meio de comunicação.

Sabe-se que as linhas de transmissão de energia não foram inicialmente projetadas para transmitir dados, mas acabaram por assumir essa função pela primeira vez com o intuito de proteger seções do sistema de distribuição de energia elétrica em casos de falha. A partir de então, verificou-se que a rápida troca de informações dentro da rede elétrica é de fundamental importância para a melhoria de seu funcionamento. Ainda dentro dessa lógica, sabe-se que as torres de transmissão de energia são estruturas bastante robustas e mais: percebeu-se que, em localidades remotas, onde ainda não existe uma infraestrutura de telecomunicações instalada, a comunicação via linha de transmissão de energia pode ser uma ótima alternativa [31].

Apesar de não ser uma tecnologia completamente nova, a abordagem via linhas de transmissão de energia tem ganhado uma maior visibilidade nos últimos anos, graças a uma série de fatores, mesmo que os Kbps de dados exigidos pela aplicação energética nem se comparem aos Mbps necessários ao suporte das modernas aplicações multimídia. Alguns dos fatores que influenciaram o ressurgimento da comunicação através das linhas de transmissão de energia: o avanço da *internet*, alto grau de integração dos circuitos e avanços do processamento digital de sinais. Todos esses avanços tornaram viável o uso das comunicações via rede elétrica, especialmente para aplicações de redes locais [31].

Faz-se necessário comentar que os fios de energia não foram projetados para transportar dados e, por isso, apresentam um ambiente hostil para tal aplicação. As principais questões associadas são: variação de impedância, presença considerável de ruído e altos níveis de atenuação dependente da frequência. A fim de resolver esses problemas, foram propostas técnicas como modulação por chaveamento de frequência (FSK), acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) e multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). Após a realização de testes, ficou constatado que, para implementações de baixo custo e baixa taxa de transmissão de dados, como, por exemplo, para a proteção de seções do sistema de distribuição de energia, a técnica de modulação mais indicada é a FSK. Para aplicações que exijam uma taxa de transmissão maior que 1 Mbps, o mais apropriado é utilizar uma técnica como CDMA. E, para aplicações que necessitem de taxas acima desse valor, o mais indicado seria OFDM [31].

4.3.2. Wi-Fi

Uma alternativa às soluções de comunicação com fio seria a utilização de soluções sem fio, a fim de diminuir a quantidade de fios nas instalações. Essa redução pode trazer diversos benefícios, tais como: uma melhor organização do ambiente, a diminuição de perdas de tensão com o desgaste dos condutores, a redução dos riscos de choque, bem como uma possível redução de custos, a depender do número de nós na rede. Além de tudo, a manutenção de uma rede sem fio é mais simples, visto que elimina os problemas inseridos pela presença de uma grande quantidade de condutores.

Wi-Fi é uma marca registrada de produtos que implementam soluções para redes locais sem fio, baseadas nos padrões de rádio descritos pelo IEEE 802.11. Uma rede Wi-Fi pode ser utilizada para interconectar dispositivos eletrônicos ou mesmo para conectá-los à *internet* ou a outros tipos de redes locais. A frequência de operação de redes Wi-Fi pode ser de 2,4 ou 5 GHz, com alguns dispositivos operando em ambas as frequências (*dual band*) [32].

As redes Wi-Fi podem ser simples ou complexas, dependendo da aplicação a que são destinadas. O tipo mais simples de rede Wi-Fi é composto por vários dispositivos conectados a um modem, cuja principal função é de gerenciamento. O modem Wi-Fi pode estar conectado à *internet* através do serviço de um provedor (via cabo, por exemplo). O *gateway* Wi-Fi, por sua vez, conecta os dispositivos da rede entre si, permitindo um compartilhamento do acesso à *internet* provido pelo modem. Muitas vezes, as funções de modem e *gateway* são implementadas em um único dispositivo [32].

A Tabela 11 a seguir apresenta a frequência de operação e a taxa máxima de transferência para as várias gerações de Wi-Fi.

Tabela 11 Características das várias gerações de Wi-Fi.

Geração	Frequência de operação	Taxa máxima de transferência
802.11a	5 GHz	54 Mbps
802.11b	2,4 GHz	11 Mbps
802.11g	2,4 GHz	54 Mbps
802.11n	2,4 GHz 5 GHz 2,4 ou 5 GHz (selecionável) 2,4 e 5 GHz (concorrente)	450 Mbps

4.3.3. ZigBee

ZigBee é uma solução de comunicação também baseada em padrões de tecnologia sem fio e projetada para atender a requisitos de baixo custo e baixo consumo para aplicações de controle em diversos mercados. Segundo [33], consumidores, negócios, governos e indústrias utilizam ZigBee para ganhar mais controle sobre suas atividades diárias.

Apesar das semelhanças com o Wi-Fi como, por exemplo, a frequência de operação em 2,4 GHz, ZigBee traz uma filosofia inovadora e desenvolve padrões específicos para a aplicação de energia inteligente. Ainda segundo [33], a implementação de ZigBee para energia inteligente é líder mundial em interoperabilidade de produtos para monitoramento, controle, informação e automação da entrega de energia e água, com o objetivo de redução de consumo e gastos.

ZigBee oferece uma diversidade de soluções para concessionárias, fabricantes de produtos e grupos governamentais alcançarem seus objetivos de suprimento das necessidades futuras de energia e água. Esses produtos prometem facilitar o desenvolvimento de soluções de energia inteligente que sejam seguras, fáceis de instalar e apresentem interfaces amigáveis [33]. A Figura 14 mostra um esquema geral do uso de ZigBee em redes residenciais, comerciais e industriais.



Figura 14 Redes residenciais, comerciais e industriais utilizando ZigBee.

A empresa Jennic lançou no mercado o JN5148, um circuito integrado que implementa ZigBee com um consumo de apenas 100 μJ por pacote transmitido [34]. Com um consumo tão baixo, é possível alimentar o circuito através de coleta de energia do ambiente, uma técnica recente cujo objetivo é desenvolver redes de sensoriamento totalmente autônomas – sem a necessidade de baterias ou fios.

4.3.4. Coleta de energia do ambiente

Com o advento das redes sem fio, foi possível eliminar os condutores antes necessários para a comunicação entre dispositivos eletrônicos. Mesmo assim, persistia a necessidade do uso de fios para a alimentação dos circuitos de medição, processamento e comunicação. O desenvolvimento da técnica de coleta de energia do ambiente, ainda em estágio de pesquisa para melhoramentos, permitiu que fossem desenvolvidos módulos para a implementação de redes de sensoriamento sem fio autônomas (aWSNs), a exemplo do JN5148 da Jennic anteriormente citado.

As aWSNs funcionam a partir da captura da energia do ambiente no qual estão inseridas. Algumas fontes de energia do ambiente são: energia mecânica (vibrações ou deformações), energia térmica (gradientes ou variações de temperatura), energia radiante (sol, infravermelho ou radiofrequência) e energia química (química ou bioquímica). Entretanto cada uma dessas fontes apresenta uma densidade de potência diferente, como mostra a Figura 15 [35].

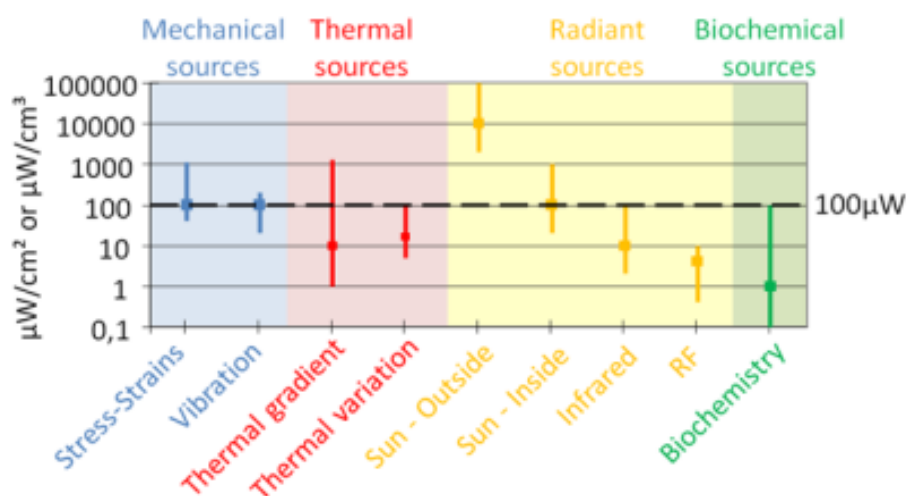


Figura 15 Densidade de potência para as diferentes fontes de energia do ambiente antes da conversão.

A partir da análise da Figura 15, é possível concluir que a fonte de energia do ambiente mais potente é a energia solar externa, mesmo se for considerada a perda de potência nas conversões que, em células fotovoltaicas não excede 20%. A questão é que esse tipo de energia não pode ser coletado em áreas escuras, ou seja, não é uma boa fonte para o contexto industrial. É importante observar que esse problema também ocorre com outras fontes como a de energia térmica, que só pode ser utilizada se existir um gradiente térmico disponível, e a de energia advinda das vibrações, que também necessita da presença de algum tipo de vibração. Portanto, é necessário conhecer com alguma profundidade a aplicação para a qual é destinada a rede de sensores sem fio alimentada por coleta de energia: não existe uma fonte de energia do ambiente universal [35].

Ainda pela Figura 15, é possível concluir que $10\text{-}100\ \mu\text{W}/\text{cm}^3$ é um valor razoável de energia que pode ser coletada através das diversas fontes analisadas e, apesar de não ser um valor alto, é suficiente para muitas aplicações, inclusive a de redes de sensores sem fio [35]. Um nó de uma rede de sensor sem fio pode ser visto como mostra o diagrama da Figura 16.

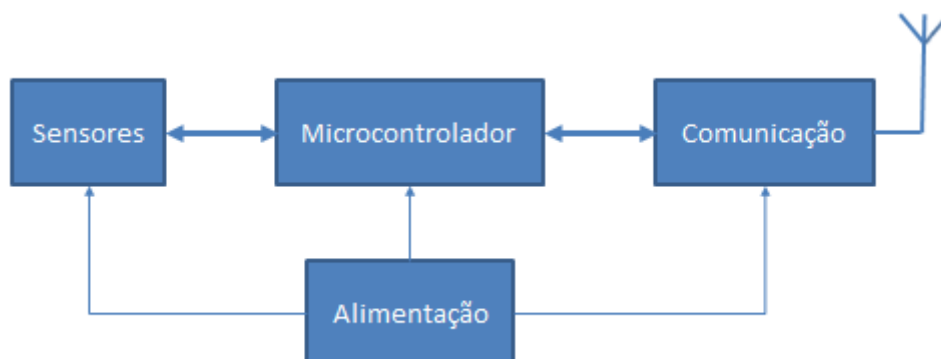


Figura 16 Diagrama de blocos de um nó numa rede de sensores sem fio.

Para que haja redução no consumo total do nó, é necessário que se reduza o consumo dos sensores, bem como dos microcontroladores e dos módulos de comunicação. Muitos progressos já foram alcançados e algumas reduções no consumo desses componentes foram conseguidas, tanto no modo de operação, quanto no modo de espera, como ilustra a Tabela 12 e a Figura 17 [35].

Tabela 12 Consumo de potência de um nó numa rede de sensores sem fio para cada um dos modos de operação.

Consumo de energia	Modo de operação
1 a 5 μW	Espera
500 μW a 1 mW	Ativo
50 mW	Transmissão

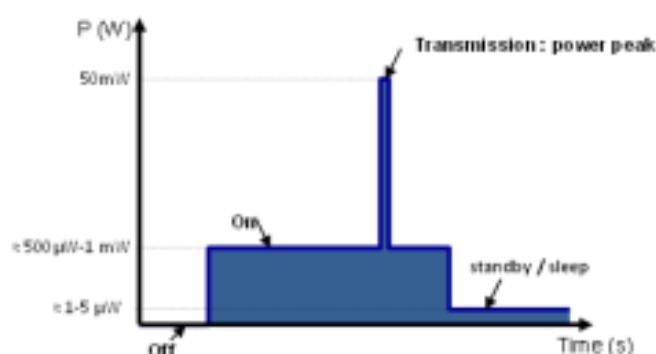


Figura 17 Gráfico do consumo de potência de um nó numa rede de sensores sem fio para cada um dos modos de operação.

Ao observar o gráfico da Figura 17, fica claro que não é possível alimentar continuamente os nós de uma aWSN através do método da coleta de energia. Porém, graças ao baixíssimo consumo no modo de espera, é possível operar num modo intermitente, alternando entre os modos de espera e ativo, como ilustra a Figura 18 [35].

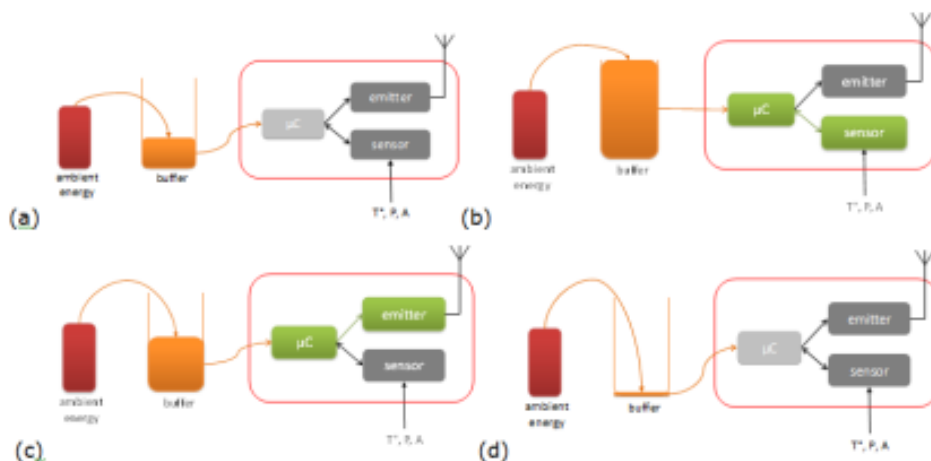


Figura 18 Ciclo de medição de um nó numa rede de sensores sem fio.

Primeiro, a energia do ambiente coletada é armazenada em um *buffer* (capacitores ou baterias). Um ciclo de medição é executado assim que haja energia suficiente armazenada. Depois, o sistema volta para o modo de espera e recomeça o processo [35]. Agora, o problema passa a ser outro: como adaptar a frequência de medição ao tempo gasto para armazenar a energia necessária?

Para calcular a potência consumida por um nó em uma rede de sensores, é necessário multiplicar a energia total consumida em um ciclo de medição pela frequência com que as medições são executadas. Assim, uma coleta contínua de $100\mu\text{W}$ permite que se execute uma medição completa a cada 1 a 10 segundos – ou seja, a frequência de medição é de 0,1 a 1 Hz –, o que está de acordo com a maioria das necessidades dentro do contexto industrial [35].

Excluindo-se as células fotovoltaicas, a coleta de energia do ambiente ainda é percebida pelos industrialistas como uma tecnologia imatura que precisa de melhorias antes de se tornar realmente interessante e largamente utilizada. Apesar disso, há uma boa percepção quanto às suas vantagens, se comparado ao uso de fios ou baterias [35]. A Tabela 13 apresenta algumas visões dos industrialistas sobre as tecnologias de coleta de energia em comparação com soluções mais comuns como fios e baterias, resultado de um estudo de mercado realizado por CEA-Leti, o laboratório de eletrônica e tecnologias da informação (Laboratoire d'Electronique et de Technologies de l'Information) [36] da comissão francesa para as energias atômica e alternativas (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) [37].

Tabela 13 Visões dos industrialistas sobre as tecnologias de coleta de energia em comparação com soluções mais comuns.

	Coleta de energia do ambiente			Soluções mais comuns	
	Vibração	Térmica	Solar	Baterias	Fios
Maturidade	Média, para pequenas indústrias	Média, já existem algumas soluções industriais	Existe há anos	Existe há anos	Solução básica
Custo	Alto	Médio	Baixo	Baixo	Baixo
Vantagens	Trabalha em	Trabalha	Baixo custo,	Baixo custo e	Baixo custo e

	quaisquer condições do ambiente desde que exista vibração e fornece uma boa potência	bem desde que o gradiente térmico seja suficiente e fornece uma boa potência	alta potência e boa maturidade	boa maturidade	potência relativamente ilimitada
Inconvenientes	Alto custo e pequena largura da banda de operação	Fonte difícil de encontrar e ocupa muito espaço (necessita de radiadores)	Não funciona em áreas escuras	Necessidade de recarregar e não é bem aceita pelas leis ambientais	Nem sempre é possível instalar, alto custo em alguns casos e peso

Hoje, as células fotovoltaicas ainda são a maneira de coletar energia do ambiente mais eficiente e bem aceita, porém essa tecnologia não caracteriza uma boa solução para o contexto industrial, justamente por causa da falta de acesso à luz solar na grande maioria dos ambientes industriais. Nesse caso, boas fontes de energia do ambiente seriam vibração e gradiente térmico, mas a coleta de energia das vibrações – das máquinas elétricas, por exemplo – ainda necessita de melhoramentos quanto à largura da banda de operação, enquanto que a coleta de energia dos gradientes térmicos precisa aumentar a sua capacidade de geração para pequenas variações de temperatura [35]. A Tabela 14 indica as limitações das tecnologias disponíveis, bem como mostra que melhoramentos podem ser feitos para atender às necessidades do mercado industrial.

Tabela 14 Limitações e melhoramentos das tecnologias de coleta de energia do ambiente.

Necessidades dos industrialistas	Limitações		Melhorias	
	Vibração	Térmica	Vibração	Térmica
Dispositivos versáteis	Largura da banda de operação limitada e dispositivo adaptado a um tipo específico de ambiente	Potência de saída depende do gradiente térmico	Aumentar a largura da banda de operação e desenvolver comportamentos não lineares e sintonização de frequências	Melhorar a qualidade dos materiais utilizados
Facilidade de instalação	Dispositivo precisa se adaptar à fonte de vibração	Não é fácil achar um bom gradiente térmico	-	-
Robustez	Limitada, devido à limitação da largura da banda de operação	Necessidade de um gradiente mínimo	-	-

Baixo custo	Custo com materiais piezoelétricos e magnéticos	Custo com materiais termoeelétricos	Produção em massa, uso de novas estruturas e materiais e soluções eletrostáticas	Produção em massa e uso de novas estruturas e materiais
Vida útil	Depende da vida útil dos materiais piezoelétricos	Depende da vida útil dos materiais termoeelétricos	-	-

4.4. Soluções encontradas no mercado

4.4.1. OptoEMU

OptoEMU é um produto da Opto22 que monitora, em tempo real, o consumo de energia dos medidores das concessionárias, bem como de painéis elétricos e equipamentos. O sensor pode ser conectado aos mais diversos dispositivos de quatro maneiras diferentes: pelo envio de pulsos, Ethernet com ou sem fio, comunicação serial ou diretamente. OptoEMU é capaz de monitorar até quatro dispositivos eletrônicos que emitam pulsos, tais como os medidores das concessionárias. Além de tudo, o sensor é capaz de conectar-se a até 64 dispositivos Modbus através das interfaces Ethernet ou serial RS-232/RS-485. Também é possível conectar o sensor da Opto22 diretamente a painéis elétricos ou equipamentos através de transformadores de corrente internos. O sensor suporta um painel ou equipamento trifásico ou três monofásicos [38]. A Figura 19 apresenta o OptoEMU ligado a diversos dispositivos, enquanto que a Figura 20 mostra como se dá a ligação direta a painéis ou equipamentos elétricos.

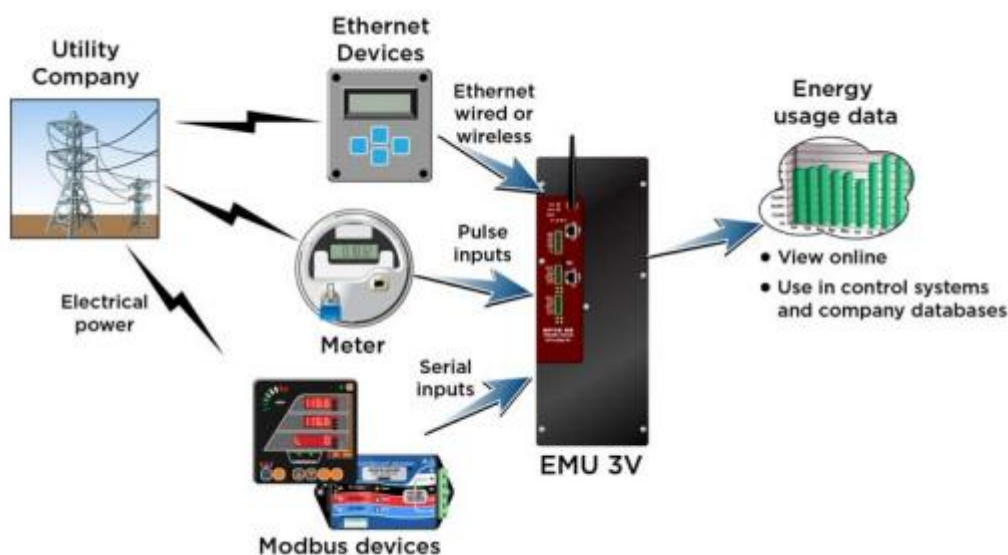


Figura 19 Possibilidade de ligação do OptoEMU a diversos dispositivos.

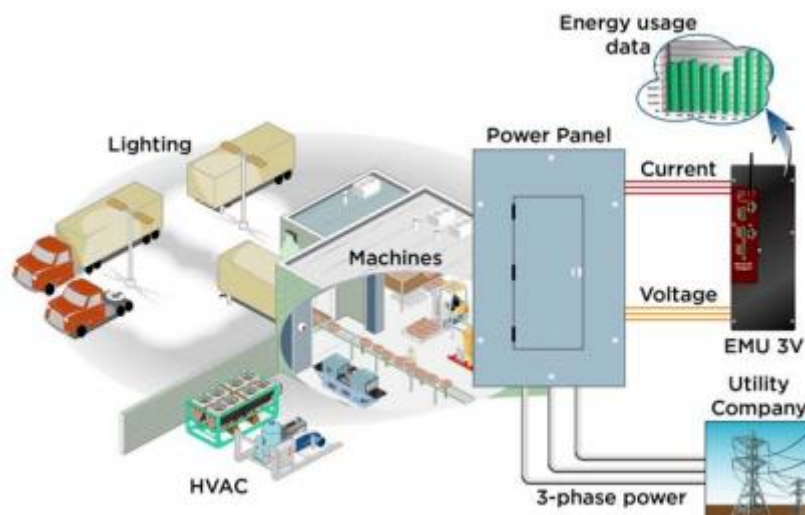


Figura 20 Ligação direta do OptoEMU a painéis ou equipamentos elétricos.

A interface de comunicação de saída utilizada por OptoEMU é Ethernet de 10/100 Mbps ou rede local sem fio baseada nos padrões 802.11a, b ou g. Assim, o sensor da Opto22 dá ao usuário uma flexibilidade na escolha do tipo de comunicação a ser adotado: com ou sem fio [38].

4.4.2. PowerMonitor W250

PowerMonitor W250 é um produto da Allen-Bradley que combina a medição do consumo de energia elétrica com comunicação sem fio. O W250 mede os seguintes parâmetros: tensão, corrente, potência e frequência através de transformadores de corrente integrados [39]. A Figura 21 a seguir mostra uma visão geral de um sistema que utiliza os medidores PowerMonitor W250.

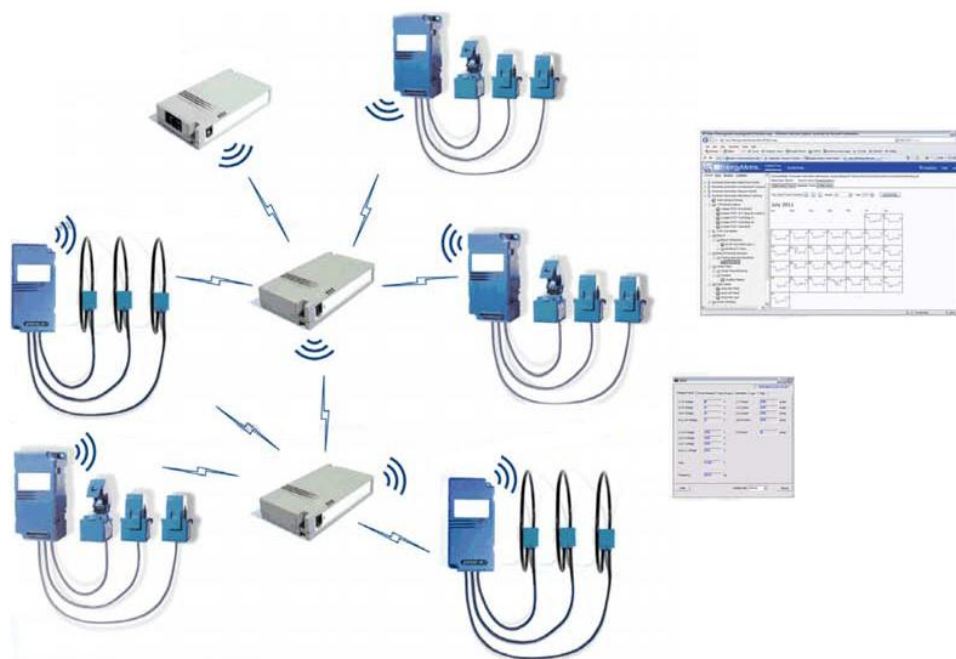


Figura 21 Visão geral de um sistema usando o PowerMonitor W250.

O PowerMonitor W250 envia os valores de potência ativa acumulada, potência reativa e potência aparente, por fase e total, em intervalos de 1 minuto. Em intervalos maiores, de alguns minutos (essa configuração é feita pelo usuário), são enviadas novas informações, a saber: tensão mínima por fase e corrente máxima por fase. Outros tipos de dados enviados em situações específicas são: identificação do nó na rede, configurações diversas, status, versão e palavras de comando, bem como a configuração do intervalo variável citado anteriormente [39].

4.4.3. EPM 9900

O EPM 9900 é um produto da General Electric desenvolvido para concessionárias e aplicações industriais que monitora o consumo em tempo real, bem como gerencia o pico de demanda. O envio de dados é feito via Ethernet, serial RS-485 ou Modbus, com suporte para até 8 conexões Ethernet simultâneas. O medidor oferece 16 saídas de relé para uma aplicação de controle, bem como 40 entradas digitais de status. Um método de amostragem cuja precisão é de 0,06% foi utilizado para a medição do consumo, com uma taxa de amostragem de até 1024 amostras por ciclo. São utilizados conversores de analógico para digital com resolução de 16 bits [40]. A Figura 22 mostra um exemplo de aplicação na qual o EPM 9900 está ligado em rede a outros dispositivos monitores e a um *software* de análise.

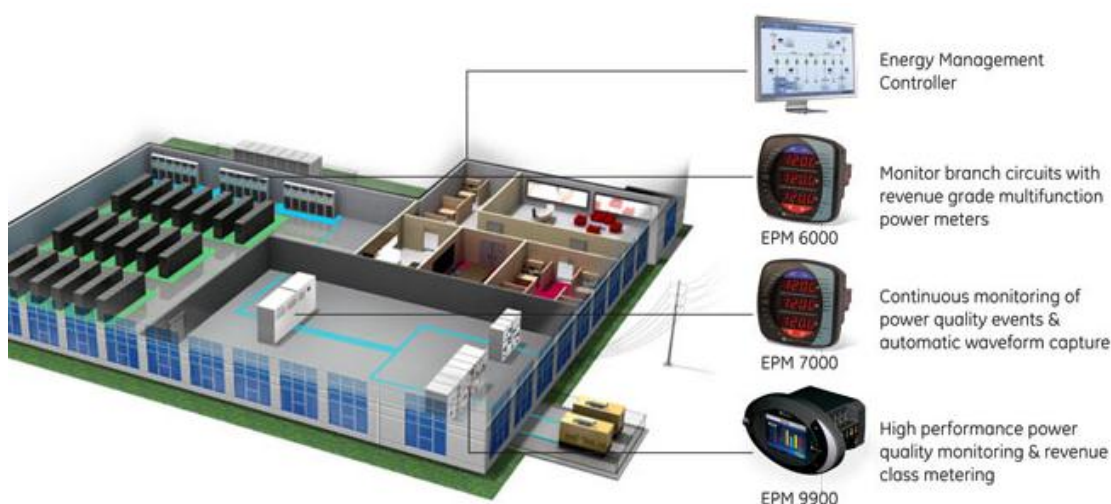


Figura 22 Exemplo de uso do EPM 9900.

4.4.4. SENTRON PAC4200

O SENTRON PAC4200 é um produto da Siemens que mede mais de 200 grandezas elétricas, das quais mais de 50 são de variáveis como: tensão, corrente, potências, consumo de energia, fator de potência, etc. O dispositivo de medição SENTRON PAC4200 realiza tanto medições monofásicas, quanto multifásicas de 3 ou 4 condutores. Além das duas entradas digitais, duas saídas digitais e uma porta no padrão Ethernet, é possível acoplar módulos que estendem as funcionalidades de comunicação do dispositivo de medição para protocolos como Profibus e Modbus. Existem também módulos de extensão do número de entradas e saídas para aplicações que necessitam de mais informações e comandos [41]. A Figura 23 apresenta o SENTRON PAC4200.



Figura 23 SENTRON PAC4200.

A partir das extensões que implementam protocolos de comunicação industriais como Modbus e Profibus, é possível integrar o SENTRON PAC4200 a sistemas mais complexos dentro do ambiente industrial. A peça-chave para essa integração é o CLP, pois é o responsável por processar as leituras dos sensores e enviar comandos aos atuadores, além de fazer a interface entre os sistemas de monitoramento e controle e os sistemas de análise e gerenciamento. A Siemens oferece várias soluções de CLP, dentre as quais está a família SIMATIC S7, uma das mais utilizadas [42]. A Figura 24 mostra uma visão geral de um sistema que usa um CLP da família SIMATIC S7, sensores – dentre eles, o SENTRON PAC4200 – e atuadores diversos, bem como *softwares* de gerenciamento.

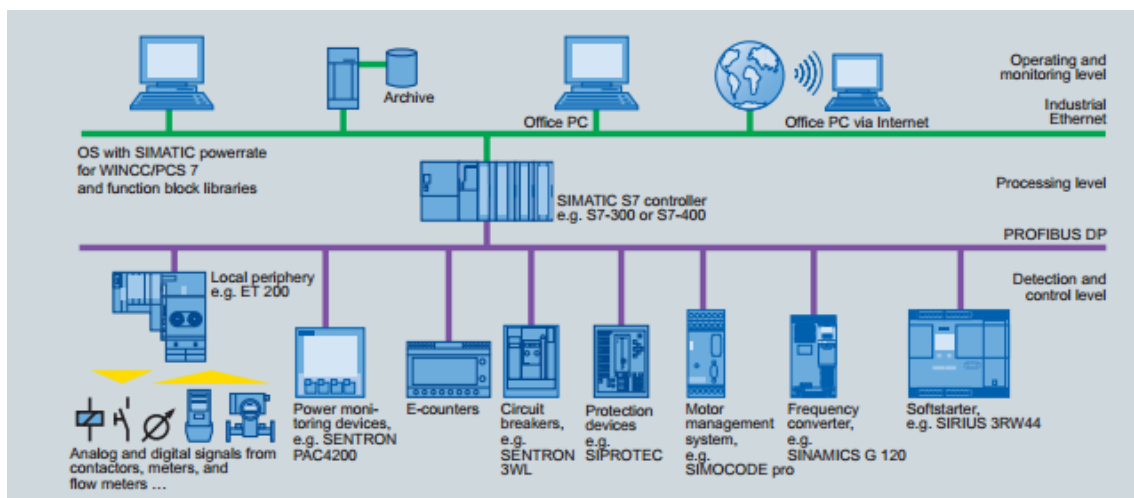


Figura 24 Visão geral de uma rede industrial.

4.4.5. MEDE 330

O MEDE 330 é um produto da iLuna Tecnologia capaz de monitorar, em tempo real, grandezas elétricas como tensão RMS, corrente RMS, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência e consumo em kWh. O medidor usa um sensor de efeito Hall, apresenta uma precisão de 2% e possui três canais monofásicos ou um trifásico. Os protocolos de comunicação utilizados são ZigBee e RS-485. Algumas das funcionalidades do MEDE 330 para aplicações industriais: previsão da manutenção, controle do consumo de energia, controle do pico de demanda, controle do fator de potência e identificação de perdas de energia [43]. A

Figura 25 oferece uma visão geral de um sistema que utiliza uma rede ZigBee para integrar o MEDE 330 e um sensor digital de temperatura.

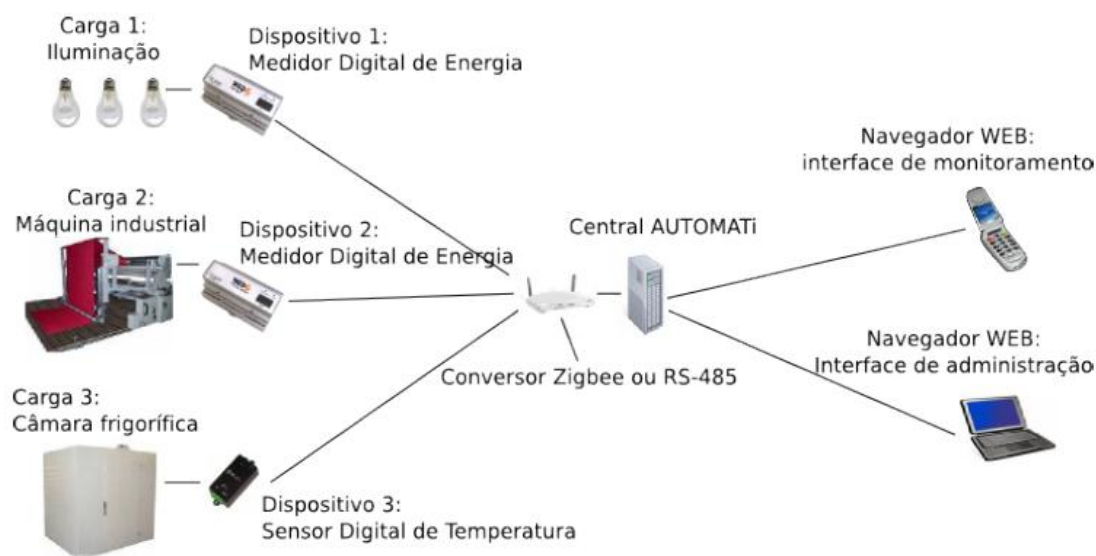


Figura 25 Visão geral de um sistema que utiliza o MEDE 330.

4.4.6. Tabela comparativa

Para comparar as soluções descritas nas seções anteriores, foram definidos os oito parâmetros apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 Comparação entre as soluções de mercado analisadas.

Solução	OptoEMU	PowerMonitor W250	EPM 9900	SETRON PAC4200	MEDE 330
Método de medição	CT	CT	Amostragem	CT	Sensor de efeito Hall
Comunicação	Ethernet 802.11a 802.11b 802.11g	Sem fio não especificada	Ethernet RS-485 Modbus	Ethernet Modbus Profibus	ZigBee RS-485
Integração com CLP	Não	Não	Sim	Sim	Não
Display	Não	Não	Sim	Sim	Não
Integração com software	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Precisão	0,2%	1%	0,06%	N/A	2%
Saídas para controle	Não possui	Não possui	16 saídas de relé	Módulos de extensão	Não possui
Quantidade de canais	1 tri ou 3 mono	1 tri ou 3 mono	N/A	Mono e poli até 4 fases	1 tri ou 3 mono

5. Prova de conceito

A prova de conceito definida para este trabalho é um medidor que calcula seis grandezas básicas, a saber: tensão RMS, corrente RMS, potência ativa, potência aparente, potência reativa e fator de potência. Para a implementação do medidor anteriormente descrito, foi escolhida a técnica de medição de corrente baseada em resistor *shunt*, por uma questão de simplicidade.

Para calcular as grandezas, são necessárias medições de tensão da rede e corrente consumida pelo equipamento ligado a ela. Por isso, foi usado um circuito que monitora a rede elétrica através de um transformador abaixador de tensão e outro circuito que monitora a corrente consumida através de um resistor de baixa resistência e alta potência (resistor *shunt*). Em ambos os casos, é necessário um circuito de adição de *offset*, que foi implementado por um amplificador operacional. E, apenas no caso da tensão, faz-se necessário também um circuito de condicionamento do sinal, que foi implementado por um divisor de tensão. Os cuidados com o condicionamento do sinal e a adição do *offset* são necessários porque os conversores de analógico para digital utilizados numa etapa posterior não suportam números fora da faixa de 0 a 5V.

A Figura 26 e a Figura 27 ilustram as simulações realizadas antes da montagem dos circuitos. Na Figura 26, é possível ver um gerador de sinal que simula a tensão da rede elétrica de 60 Hz e 311V_p. Logo depois, o transformador abaixa a tensão para 13,51V_p e o divisor de tensão condiciona o sinal para 1,65V_p, como mostram o segundo e terceiro gráficos. A função do amplificador operacional é somar um nível de tensão contínua de 1V ao sinal. Assim, a saída final apresenta uma tensão de pico de 2,66V.

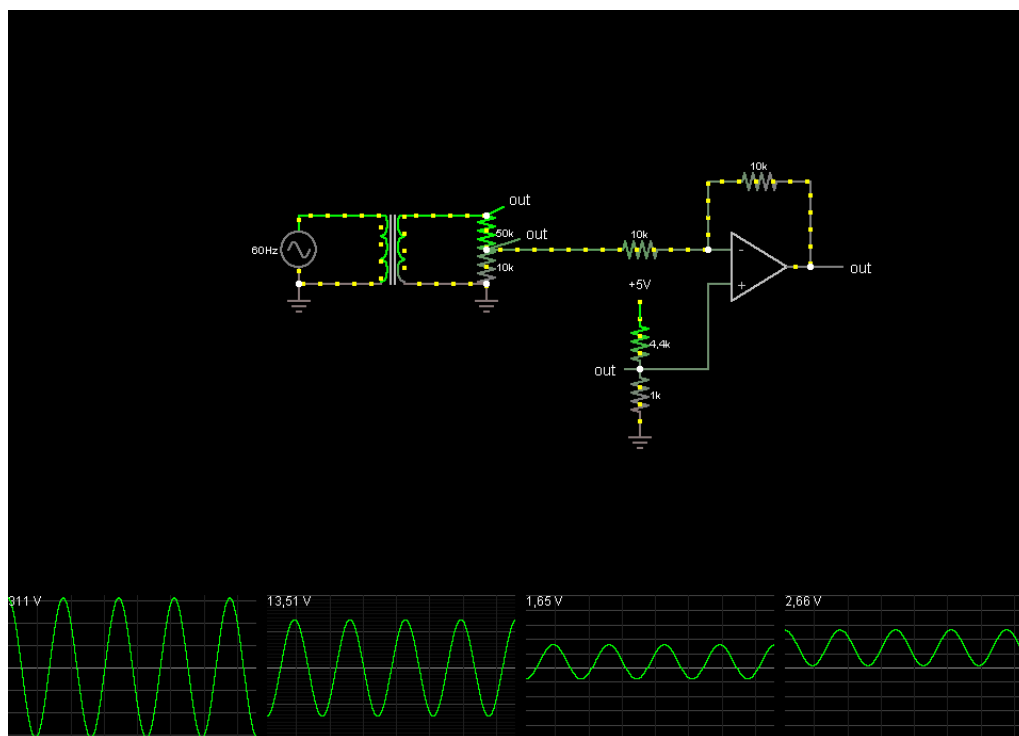


Figura 26 Simulação do circuito de monitoramento da tensão da rede elétrica.

Já pela Figura 27, é possível observar o gerador de sinal simulando uma tensão de 60 Hz e 200mV_p sobre o resistor *shunt* de 1,4Ω para uma carga resistiva de 30W. Como, nesse caso, não é necessário o condicionamento do sinal, então apenas adiciona-se um nível de tensão contínua para evitar os valores negativos, como já foi explicado anteriormente.

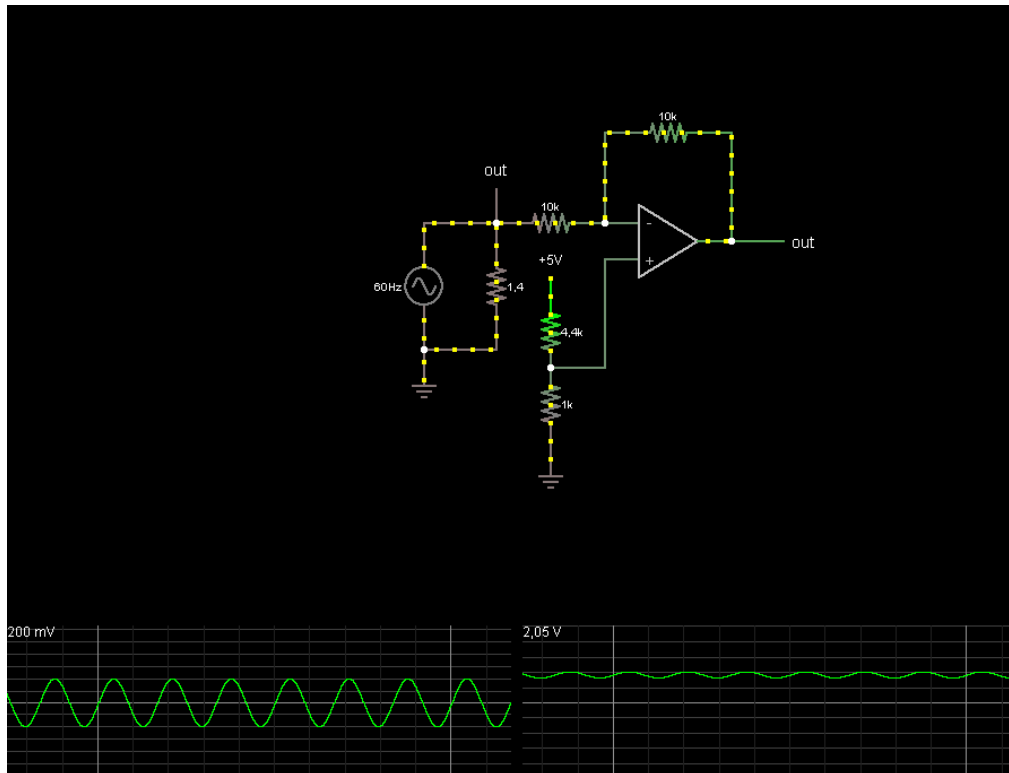


Figura 27 Simulação do circuito de monitoramento da corrente consumida por um equipamento ligado à rede elétrica.

A Figura 28 a seguir mostra os circuitos acima descritos após a montagem.

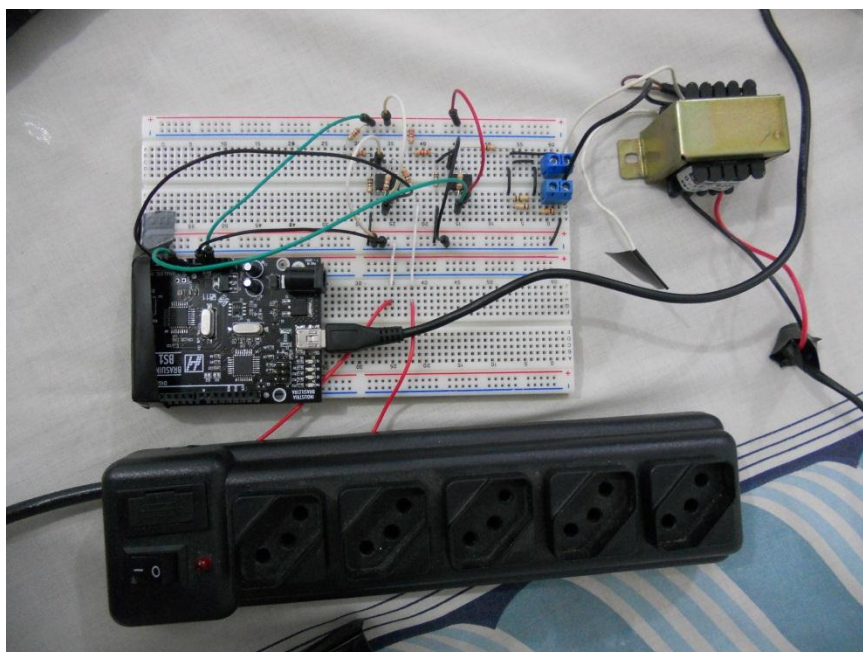


Figura 28 Circuitos de medição de tensão e corrente montados.

Após montado o circuito, foram realizados vários testes com o osciloscópio. A Figura 29 mostra os sinais de entrada do circuito de medição. O sinal amarelo é a representação da tensão de saída do transformador: com 5 Volts por divisão, tem-se, aproximadamente, $13,5V_p$, como já era esperado. Ainda na Figura 29, a curva verde representa a tensão sobre o resistor *shunt*: com 1 Volt por divisão, tem-se, aproximadamente, $0,2V_p$ ou $200mV_p$, como também já era esperado.

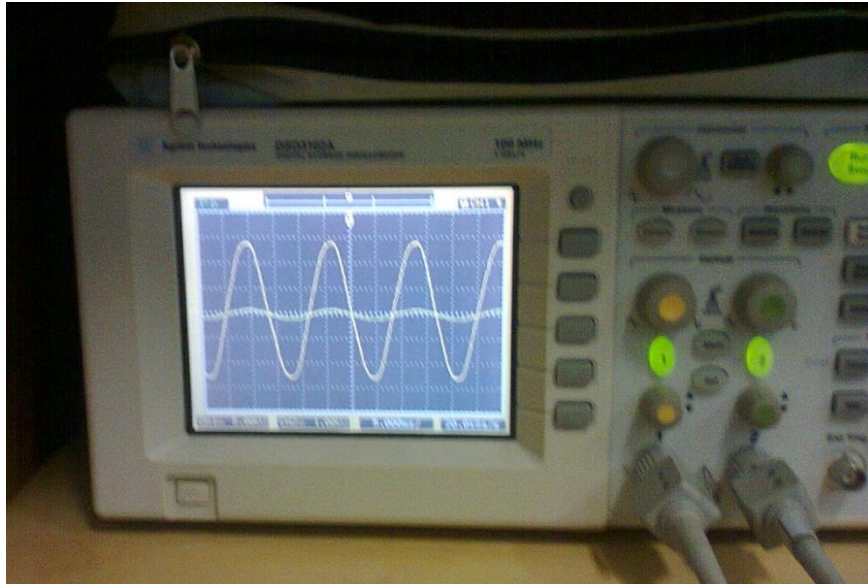


Figura 29 Sinais de entrada do circuito de medição.

A Figura 30 apresenta as saídas do circuito de medição para uma carga resistiva. Pode-se observar que tanto o sinal de tensão da rede (curva amarela), quanto o sinal de tensão sobre o resistor *shunt* (curva verde) estão em fase, o que faz sentido para cargas resistivas. Além disso, o sinal de saída da tensão da rede está com, aproximadamente, $1,5V_p$ e o sinal de saída da tensão sobre o resistor *shunt* está com, aproximadamente, $0,2V_p$ ou $200mV_p$ – ambos os casos estão condizentes com a simulação. Por fim, é importante perceber que as curvas agora têm todos os seus valores positivos, graças à adição do *offset*.

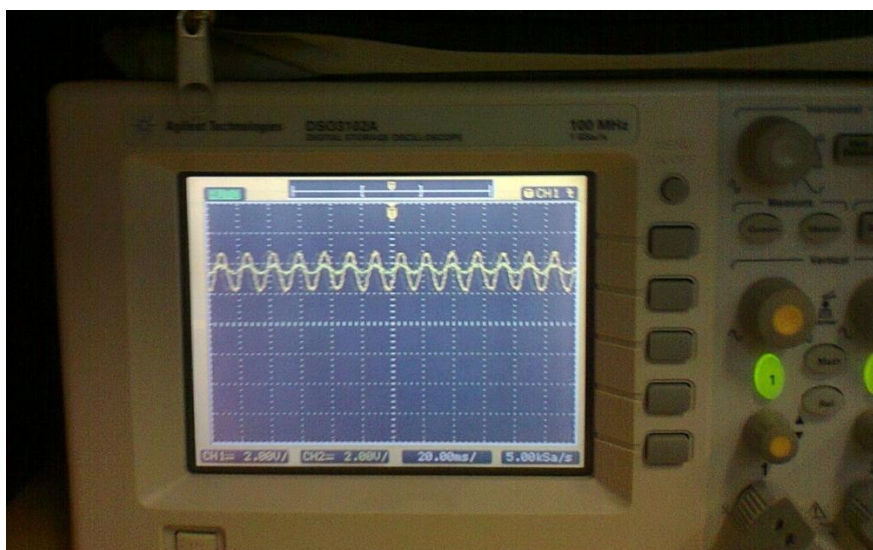


Figura 30 Sinais de saída do circuito de medição.

O segundo passo da implementação consiste em ler os dados medidos e, posteriormente, calcular as grandezas de interesse. Para tal processamento, por uma questão de simplicidade, foi escolhida a plataforma arduino [44], que integra um MCU a periféricos de propósito geral. O arduino é uma plataforma de *hardware* livre desenvolvida para facilitar a prototipação de projetos, independente da aplicação. A configuração escolhida utiliza um ATMEGA328, microprocessador da Atmel, de 16 MHz, com 32 kiB de memória flash, 2 kiB de memória RAM e 1 kiB de memória EEPROM. O arduino possui tanto entradas digitais, quanto analógicas e, portanto, já possui conversores internos de analógico para digital. Segundo [45], se forem feitas as modificações necessárias, o arduino pode ser considerado um conversor de analógico para digital de 56 mil amostras por segundo de baixo custo, pois não existe no mercado um dispositivo desse tipo por menos de 100 dólares, enquanto que um arduino custa apenas 30 dólares. A Figura 31 abaixo apresenta um dos modelos de arduino disponíveis no mercado.



Figura 31 Arduino Uno.

Para que o arduino atinja uma taxa de amostragem razoável dos dados de entrada analógicos, faz-se necessária uma espécie de *hacking*. O *clock* original do conversor de analógico para digital do arduino é de 16 MHz dividido por um fator de escala pré-definido chamado *prescale*. O valor original do *prescale* é 128, o que resulta em uma frequência de 125 kHz. Como a conversão consome 13 ciclos de *clock*, a taxa de amostragem fica em cerca de 9600 Hz. Assim, o *hack* consiste em mudar o valor original do *prescale* de 128 para 16, o que resulta em uma frequência de 1 MHz e uma taxa de amostragem de, aproximadamente, 77 kHz.

O próximo passo é converter os dados de leitura de um valor digital entre 0 e 1023 (os conversores de analógico para digital do arduino têm uma precisão de 10 bits) para um valor analógico entre 0 e 5V. Para isso, multiplica-se os valores lidos por um fator de 5 dividido por 1024. Depois, é necessário compensar tanto o condicionamento, quanto a adição do *offset* feitos pelo circuito de medição. Sabe-se que a tensão foi abaixada de $311V_p$ para algo em torno de $2V_p$. Nesse caso, é definido um fator de multiplicação de 155,5 (divisão de $311V_p$ por $2V_p$). Com relação à corrente, é necessário transformar o valor de tensão sobre o resistor *shunt* para um valor que represente a corrente consumida pela carga. Para isso, divide-se o valor de tensão lido por um fator de 1,41 correspondente à resistência do *shunt* utilizado. O valor de *offset*, por sua vez, é calculado da seguinte maneira: são feitas 50 medições, das quais são

retirados o maior e o menor valor. Uma média aritmética simples entre esses dois valores define o *offset*, que logo em seguida é subtraído do sinal de entrada.

A partir de então, depois de feitas todas as conversões, são realizados os cálculos a cada 5000 amostras coletadas. Primeiro, são definidas três variáveis que servirão de acumuladores. Uma para os valores de tensão ao quadrado, outra para os valores de corrente ao quadrado e a última para os valores de potência – tensão multiplicada pela corrente. Ao final do processo de acúmulo das 5000 amostras, como descrito anteriormente, são calculadas as grandezas de acordo com o conjunto de equações que se seguem:

$$Tensão\ RMS = \sqrt{\frac{acumulador_tensão}{número_amostras}}$$

$$Corrente\ RMS = \sqrt{\frac{acumulador_corrente}{número_amostras}}$$

$$Potência\ Ativa = \frac{acumulador_potência}{número_amostras}$$

$$Potência\ Aparente = Tensão\ RMS \times Corrente\ RMS$$

$$Potência\ Reativa = \sqrt{(Potência\ Aparente^2 - Potência\ Ativa^2)}$$

$$Fator\ de\ Potência = \frac{Potência\ Ativa}{Potência\ Aparente}$$

Por fim, os dados são enviados via porta serial para que o computador imprima os valores calculados em tela. A Figura 32 e a Figura 33 mostram os resultados dos testes realizados para uma carga resistiva, bem como para uma carga indutiva, com o medidor construído como prova de conceito.

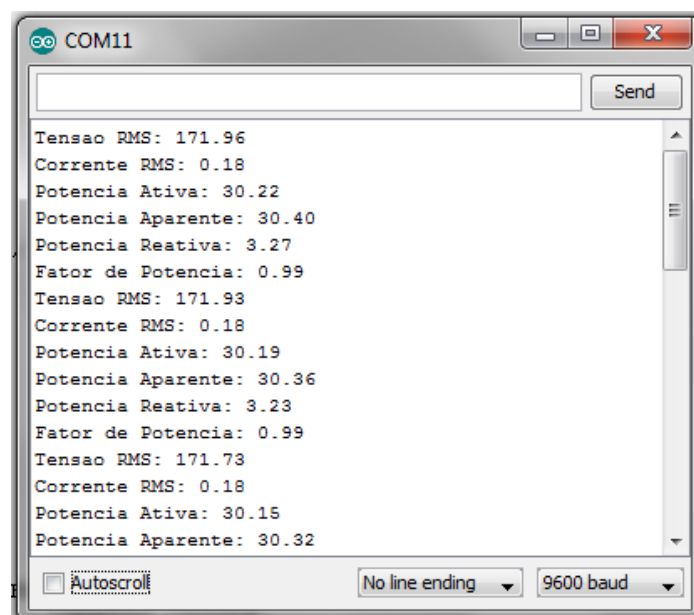


Figura 32 Resultados do medidor para uma carga resistiva.

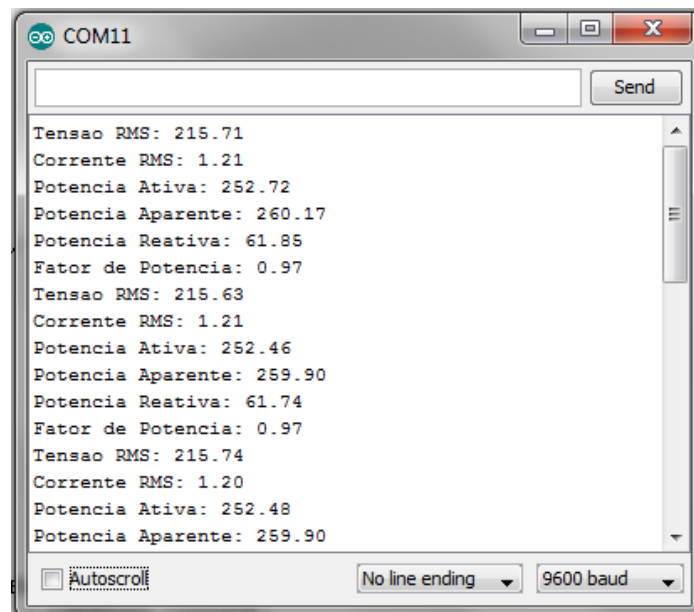


Figura 33 Resultados do medidor para uma carga indutiva.

É possível observar, pela Figura 32, que corrente e tensão estão praticamente em fase, o que nos dá uma potência reativa muito baixa e, consequentemente, um fator de potência muito perto de 100%. Esse resultado faz sentido, uma vez que a carga monitorada é resistiva. Observa-se também que a potência ativa é de, aproximadamente, 30W, resultado que condiz com a potência nominal do equipamento. Por outro lado, nota-se, na Figura 33, que a carga indutiva apresenta um comportamento diferente. A defasagem entre tensão e corrente provoca uma potência residual chamada potência reativa. Assim, o fator de potência cai para 97%. A potência nominal do equipamento é de 700W, porém a potência ativa medida ficou em torno de 250W. Esse resultado faz sentido, se for levado em consideração o fato de que o secador de cabelo usado no teste é bastante antigo e que sua perda de potência ao longo dos anos é notória. Em ambos os casos, é possível identificar uma tensão RMS próxima de 220V (valor nominal de tensão da rede elétrica) – 172V no primeiro caso e 216V no segundo.

Todo o código-fonte do *firmware* descrito neste capítulo encontra-se integralmente disponível no Apêndice A deste documento.

6. Conclusões e trabalhos futuros

O principal objetivo deste trabalho era formalizar uma base para o entendimento do problema de ineficiência do consumo de energia elétrica com foco no setor industrial. Para isso, foram definidos os conceitos básicos apresentados no Capítulo 2 deste relatório. A partir de então, foi possível analisar criticamente as diversas soluções encontradas no mercado ou ainda em pesquisa. Com relação a esse ponto, foram dadas diversas contribuições. Primeiro, listou-se uma série de soluções de medição e de comunicação. Depois, com a apresentação dos produtos encontrados no mercado, foi possível identificar algumas das questões levantadas na análise das soluções. E, por fim, foi feita uma tabela comparativa que evidenciou os pontos fortes e fracos de cada solução de mercado analisada.

A fim de corroborar os resultados das pesquisas, foi implementada uma prova de conceito, que consistiu em um medidor simples do consumo de energia elétrica. Com a implementação, foi possível enfrentar alguns dos problemas mais comuns, a saber: testes físicos não condizentes com a simulação dos circuitos, problemas inseridos pela amostragem do sinal, atrasos devido ao *overhead* do cálculo das grandezas, etc. E a importância da prova de conceito está, exatamente, em desenvolver soluções para a resolução dos problemas anteriormente citados.

A partir da prova de conceito implementada, é possível pensar em algumas melhorias como, por exemplo, o uso de sensor de efeito Hall para a medição da corrente ou o uso de um circuito integrado dedicado (AFE) para o cálculo das grandezas. Um passo adiante seria a replicação do medidor desenvolvido para uma posterior ligação em rede e a implantação desse sistema em um ambiente real. Também se pode pensar no uso de tecnologias mais avançadas como, por exemplo, em coleta de energia do ambiente para a alimentação dos sensores.

Assim, quando for formalizado um modelo mais estável de medidor e a partir do levantamento de dados colhidos com a implantação de um sistema de medidores em ambientes industriais reais, será possível pensar em um software de gerenciamento dos equipamentos dentro da planta industrial, a fim de atingir o objetivo macro de utilização eficiente da energia elétrica disponível e uma consequente redução de gastos.

7. Referências

- [1] LITOS STRATEGIC COMMUNICATION. Desenvolvido pela Litos Strategic Communication. 2012. Apresenta informações gerais referentes à instituição. Disponível em: <<http://www.litosscc.com/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [2] LITOS STRATEGIC COMMUNICATION. **Smart Grid: An Introduction**. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages%281%29.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [3] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. **Understanding the Benefits of the Smart Grid**. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/06.18.2010_Understanding%20Smart%20Grid%20Benefits.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [4] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. Desenvolvido pelo Departamento de Energia do Governo dos Estados Unidos da América. Apresenta informações gerais referentes ao laboratório. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [5] DOW, Mike. **Smart Meters: One Size Does Not Fit All**. Disponível em: <http://newanglemedia.com/smart-energy/2012/?utm_source=AvnetOnDemandBlog&utm_medium=wb&utm_content=AvnetOnDemandBlog&utm_campaign=Energy>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [6] MAXIM. **Smart Meters: Overview**. Disponível em: <<http://www.maxim-ic.com/solutions/guide/smart-grid/smart-meter.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [7] GRANATO, Sérgio; VIEIRA, José Gonçalves. Medição Inteligente e a Smart Grid. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/conheca-com-exclusividade-o-primeiro-trabalho-sobre-smart-grid-desenvolvido-por-pesquisadores-brasileiros/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Medidores Eletrônicos em Unidades Consumidoras do Grupo B**: Audiência Pública nº 043/2010. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/apresentacao/aneel_ap_043_2010.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [9] G1. **15% da energia elétrica do país é roubada**: Furto de energia provoca prejuízo de R\$ 5 bilhões por ano. Disponível em: <http://g1.globo.com/Noticias/Economia_Negocios/0,,MUL20379-9356,00-DA+ENERGIA+ELETRICA+DO+PAIS+E+ROUBADA.html>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [10] MORARU, S-A. et al. **Monitoring of Energy Consumption in Industrial Environment using Integrated Software System**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4602476>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [11] LÍBANO, F. et al. **Power Energy Meter in a Low Cost Hardware/Software**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04078503>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [12] SOLA, Antonio Vanderley Herrero et al. **Análise dos Fatores Determinantes para Eficiência Energética**. Disponível em: <<http://pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/ebook/2006/57.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.

- [13] SOLA, Antonio Vanderley Herrero; KOVALESKI, João Luiz. **Eficiência Energética nas Indústrias: Cenários e Oportunidades**. Disponível em:
<<http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/Ebook/ARTIGOS/81.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [14] TSCHOEKE, Erivelto; MARÇAL, Rui Francisco Martins; RESENDE, Luis Mauricio Martins. **Transformando a Gestão da Manutenção em Competitividade, Produtividade e Lucratividade Dentro de um Ambiente Produtivo**. Disponível em:
<<http://www.pg.cefetpr.br/incubadora/wp-content/themes/utfpr-gerec/artigos/71.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [15] LIMA, Walter da Costa; LIMA, Carlos Roberto Camello; SALLES, Antonio Arantes. **Manutenção Preditiva, o Caminho para a Excelência: Uma Vantagem Competitiva**. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/498.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [16] WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. Disponível em:
<<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~aryvictorino/leituras%20SIP%202011-1/sugest%C3%A3o%20de%20leitura%20da%20aula%2013%20-%20manual%20para%20Corre%C3%A7%C3%A3o%20do%20fp%20WEG.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [17] SIEMENS. **Industrial Productivity**: Production that is Faster, Better, More Economical. Disponível em: <<http://www.siemens.com/industrial-productivity/industrial-productivity.html>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [18] CPN. **Energia Elétrica**: Geração, Transmissão e Distribuição. Disponível em:
<http://www.fundacentro.gov.br/dominios/ctn/anexos/cdNr10/Manuais/M%C3%B3dulo01/333_1-%20INTRODU%C3%87%C3%83O%20A%20SEGURAN%C3%87A%20COM%20ELETRICIDADE.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [19] ELETROBRAS DISTRIBUIÇÃO ALAGOAS. **Tabela de Tarifas**. Disponível em:
<http://www.ceal.com.br/tarifas_tabela.aspx>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [20] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Eficiência Energética na Indústria**: O que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília, 2009. Disponível em:
<<http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/FF808081234E24EA0123627A07156F8E/Eficiencia.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [21] SENADO FEDERAL. **Projetos e Matérias Legislativas**: Projeto de Lei do Senado, nº 402. Disponível em:
<http://www.senado.gov.br/atividade/materia/detalhes.asp?p_cod_mate=93127>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [22] REDE INTELIGENTE. **Normas ABNT Aplicáveis aos Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica Discutidas em Consulta Nacional**. Disponível em:
<<http://www.redeinteligente.com/2012/06/21/normas-abnt-aplicaveis-aos-medidores-eletronicos-de-energia-eletrica-discutidas-em-consulta-nacional/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [23] PATEL, Shwetak et al. **At the Flick of a Switch**: Detecting and Classifying Unique Electrical Events on the Residential Power Line. Disponível em:
<http://abstract.cs.washington.edu/~shwetak/papers/ubicomp2007_flick.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.

- [24] GUPTA, Sidhant; REYNOLDS, Matthew; PATEL, Shwetak. **ElectriSense**: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home. Disponível em: <<http://www.cs.washington.edu/homes/sidhant/docs/ElectriSense.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [25] PACIFIC SCIENTIFIC OECO. **Methods of Current Measurement**. Disponível em: <http://www.oeco.com/methods_current_measurement.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [26] SIAVOSHI, Fardad; REGAN, David. **Precision AC Power Measurement**. Disponível em: <http://newanglemedia.com/smart-energy/2012/?utm_source=AvnetOnDemandBlog&utm_medium=wb&utm_content=AvnetOnDemandBlog&utm_campaign=Energy>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [27] MORRISON, David. **Mixed-signal ICs Build Smart Energy Meters**. Disponível em: <http://powerelectronics.com/mag/power_mixedsignal_ics_build/>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [28] CIRRUS LOGIC. **Energy Measurement**. Disponível em: <http://www.cirrus.com/en/products/energy_measurement.html>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [29] CIRRUS LOGIC. **Energy Measurement**: 2012 Product Portfolio. Disponível em: <http://www.cirrus.com/en/pubs/brochure/energy_measurement_brochure_201201.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [30] MAXIM. **Energy Measurement**. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com/solutions/smart-building/parts.mvp/scpk/3918/pl_pk/0>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [31] MAJUMDER, Anindya; CAFFERY JUNIOR, James. **Power Line Communications**: An Overview. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1343222>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [32] WI-FI. Desenvolvido pela Wi-Fi Alliance. 2012. Apresenta informações gerais referentes à marca e à organização. Disponível em: <<http://www.wi-fi.org/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [33] ZIGBEE. Desenvolvido pela ZigBee Alliance. 2012. Apresenta informações gerais referentes à marca e à organização. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/Home.aspx>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [34] COLE, Bernard. **ZigBee Based Transmission Uses Only 100 mJ of Harvested Energy**. Disponível em: <<http://www.eetimes.com/discussion/other/4027554/NEWS-ZigBee-based-transmission-uses-only-100-microjoules-of-harvested-energy>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [35] BOISSEAU, Sebastien; DESPESSE, Ghislain. **Energy Harvesting, Wireless Sensor Networks & Opportunities for Industrial Applications**. Disponível em: <<http://www.eetimes.com/design/smart-energy-design/4237022/Energy-harvesting--wireless-sensor-networks---opportunities-for-industrial-applications>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [36] LETI. Desenvolvido pela Comissão de Energia Atômica e de Energias Alternativas da França. Apresenta informações gerais referentes ao centro de pesquisa. Disponível em: <<http://www-leti.cea.fr/en>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [37] CEA. Desenvolvido pela Comissão de Energia Atômica e de Energias Alternativas da França. 2008. Apresenta informações gerais referentes ao órgão governamental e ao

- centro de pesquisa. Disponível em: <http://www.cea.fr/english_portal>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [38] OPTO22. **OptoEMU Sensor 3V Energy Monitoring Unit**. Disponível em: <http://www.opto22.com/documents/1936_OptoEMU_Sensor_Data_Sheet.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [39] ALLEN-BRADLEY. **PowerMonitor Wireless 250 Monitor**. Disponível em: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1425-um001_-en-p.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [40] GENERAL ELECTRIC. **EPM 9900 Advanced Power Quality Meter**. Disponível em: <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/epm9900.htm#epm9900_1>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [41] SIEMENS. **Multimedidor SENTRON PAC4200**. Disponível em: <<http://www.industry.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/gerenciamento-de-energia/instrumentos-de-medicao/powermeters/pac4200/Pages/Default.aspx>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [42] SIEMENS. **Savings Potential through Transparent Energy Flows: Energy Management in Low-Voltage Power Distribution**. Disponível em: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/energy-efficient-production/energy-efficient-products/sentron-powermanager/Documents/energy-management_en.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [43] ILUNA TECNOLOGIA. **MEDE 330**. João Pessoa, 2011.
- [44] ARDUINO. Desenvolvido por The Arduino Team. Apresenta informações gerais referentes à plataforma de desenvolvimento. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 05 jul. 2012.
- [45] The Arduino DAQ Chronicles. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/measuringstuff/the-arduino>>. Acesso em: 05 jul. 2012.

8. Apêndice A – Código-fonte do firmware

```
#include <Array.h>

#define FASTADC 1
#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

const float DIGITAL_TO_ANALOG = 0.0048828125;
const float CONVERSAO_TENSAO = 155.5;
const float CONVERSAO_CORRENTE = 1.41;
const int NUM_AMOSTRAS = 5000;

const byte size = 50;
int i = 0;

float analogico0[size];
float analogico1[size];
float offset_tensao = 0;
float offset_corrente = 0;
float tensao_real = 0;
float corrente_real = 0;
float sum_tensao = 0;
float sum_corrente = 0;
float sum_potencia = 0;
float tensao_rms = 0;
float corrente_rms = 0;
float potencia_ativa = 0;
float potencia_aparente = 0;
float potencia_reativa = 0;
float fator_potencia = 0;

inline float dac(int digital) {
    return digital * DIGITAL_TO_ANALOG;
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // seta o prescale para 16
    #if FASTADC
        sbi(ADCSRA, ADPS2);
        cbi(ADCSRA, ADPS1);
        cbi(ADCSRA, ADPS0);
    #endif

    // coleta 50 amostras
    for (i = 0; i < size; i++) {
        analogico0[i] = dac(analogRead(A0));
        analogico1[i] = dac(analogRead(A1));
    }

    Array<float> tensao = Array<float>(analogico0, size);
    Array<float> corrente = Array<float>(analogico1, size);

    // calcula offset
    offset_tensao = (tensao.getMax() + tensao.getMin()) / 2;
```



```

    offset_corrente = (corrente.getMax() + corrente.getMin()) / 2;
}

void loop() {

    for (i = 0; i < NUM_AMOSTRAS; i++) {
        tensao_real = (dac(analogRead(A0))-offset_tensao) *
CONVERSAO_TENSAO;
        corrente_real = (dac(analogRead(A1))-offset_corrente) /
CONVERSAO_CORRENTE;
        sum_tensao = sum_tensao + (tensao_real * tensao_real);
        sum_corrente = sum_corrente + (corrente_real * corrente_real);
        sum_potencia = sum_potencia + (tensao_real * corrente_real);

    }

    tensao_rms = sqrt(sum_tensao / NUM_AMOSTRAS);
    corrente_rms = sqrt(sum_corrente / NUM_AMOSTRAS);
    potencia_ativa = sum_potencia / NUM_AMOSTRAS;
    potencia_aparente = tensao_rms * corrente_rms;
    potencia_reativa = sqrt((potencia_aparente * potencia_aparente) -
(potencia_ativa * potencia_ativa));
    fator_potencia = potencia_ativa / potencia_aparente;

    Serial.print("Tensao RMS: ");
    Serial.println(tensao_rms);
    Serial.print("Corrente RMS: ");
    Serial.println(corrente_rms);
    Serial.print("Potencia Ativa: ");
    Serial.println(potencia_ativa);
    Serial.print("Potencia Aparente: ");
    Serial.println(potencia_aparente);
    Serial.print("Potencia Reativa: ");
    Serial.println(potencia_reativa);
    Serial.print("Fator de Potencia: ");
    Serial.println(fator_potencia);

    sum_tensao = 0;
    sum_corrente = 0;
    sum_potencia = 0;

    delay(100);
}

```